

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FABIANO SCHEER HAINOSZ

INFLUÊNCIAS DE CALIBRAÇÕES AÉREAS DE UMA CÂMARA DIGITAL
INTEGRADA COM UM SLISA NA ACURÁCIA DE ORTOIMAGENS

CURITIBA
2012

FABIANO SCHEER HAINOSZ

INFLUÊNCIAS DE CALIBRAÇÕES AÉREAS DE UMA CÂMARA DIGITAL
INTEGRADA COM UM SLSA NA ACURÁCIA DE ORTOIMAGENS

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre em Ciências
Geodésicas, no Curso de Pós-Graduação em
Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra,
Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Edson A. Mitishita

CURITIBA
2012

TERMO DE APROVAÇÃO

FABIANO SCHEER HAINOSZ

*"INFLUÊNCIAS DE CALIBRAÇÕES AÉREAS DE UMA CÂMARA DIGITAL
INTEGRADA COM UM SLSA NA ACURÁCIA DE ORTOIMAGEM"*

Dissertação nº 258 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:


Prof. Dr. Edson Aparecido Miltishita
Departamento de Geomática, UFPR


Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz
Universidade Estadual Paulista, UNESP


Prof. Dr. Quintino Dalmolin
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 15 de agosto de 2012.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), no qual atuo como pesquisador, pelo financiamento e incentivo a elaboração desta pesquisa.

À minha família, por sempre estar presente apoiando e incentivando.

Aos amigos da Divisão de Geossoluções do LACTEC, em especial a Daniele Felix pela colaboração e confiança.

Ao Professor Edson Mitishita, pela orientação, paciência e colaboração.

À Professora Luciene Delazari, por sempre ter me apoiado e incentivado.

Aos colegas do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR, em especial ao grupo de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto.

E aos Professores participantes da banca examinadora, pelas críticas, sugestões e contribuições ao trabalho.

RESUMO

Por consequência do uso da metodologia de georreferenciamento direto, a calibração de câmaras voltou a ganhar um destaque no meio acadêmico/científico. Outros fatores que impulsionaram os recentes estudos de calibração foram a utilização de múltiplos sensores, e de câmaras digitais de baixo custo na Fotogrametria. A presente pesquisa se propôs a avaliar dois procedimentos de calibração aérea de uma câmara digital de baixo custo integrada num SLSA (Sistema Laser Scanner Aerotransportado). Foi realizada uma calibração aérea independente e uma calibração em serviço, e para os dois procedimentos foram fixadas as estações de exposição da câmara a partir do uso indireto do sistema de posicionamento por satélites GNSS (*Global Navigation Satellite System*) do SLSA. Diferentes experimentos foram realizados buscando determinar um número mínimo de apoio a ser implantado no espaço objeto para realizar o procedimento da calibração em serviço. Os resultados das calibrações foram demonstrados, analisados e comparados. A pesquisa contemplou também a integração da câmara digital no SLSA e a determinação dos parâmetros de instalação dos múltiplos sensores (posições e orientações relativas). Tais parâmetros foram obtidos a partir de um método de levantamento topográfico (posições relativas) e de um processo de fototriangulação (orientações relativas). Numa abordagem mais prática, também foram avaliados mosaicos de ortoimagens segundo os critérios de exatidão e precisão estabelecidos pelo PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica). Os mosaicos de ortoimagens foram obtidos pelo método de georreferenciamento direto com o uso dos diferentes conjuntos de POI (Parâmetros de Orientação Interior), provenientes das calibrações, e também a partir de diferentes parâmetros de orientação relativa da câmara. Os resultados comprovaram que os diferentes mosaicos de ortoimagens atenderam os critérios pré-estabelecidos, e demonstraram o potencial do uso da metodologia de produção de ortoimagens sem a necessidade da utilização de pontos de apoio implantados no espaço objeto.

Palavras-chave: Georreferenciamento direto. Calibração de câmaras. Câmaras digitais de baixo custo. Calibração em serviço. Sistema laser scanner aerotransportado.

ABSTRACT

Camera calibration techniques have attracted the academic/scientific communities due to their importance on the direct georeferencing methodology. Another reason that has motivated recent investigations in this area was the increased use of low-cost cameras and multi-sensors in photogrammetric applications. This study aims to evaluate two aerial calibration procedures for a low-cost digital camera integrated with an ALSS (Airborne Laser Scanner System). An independent aerial calibration and an on-the-job calibration were performed. In both calibration procedures, the camera exposure station positions were kept fixed using the positioning from ALSS GNSS (Global Navigation Satellite System). Different experiments were conducted to determine minimum number of control points to be implemented in object space to perform the on-the-job calibration procedure. The calibration results were demonstrated, analyzed and compared. The research also included the integration of low-cost digital camera and the ALSS well as the estimation of the mounting parameters (lever arms and boresight angles) relating the system sensors. To obtain the lever arms, a traditional topographic survey method was used while for the estimation of the boresight angles a bundle adjustment procedure was employed. Evaluation of the methodology, also orthoimages mosaics were evaluated according to accuracy and precision criteria defined in the Brazilian Cartographic Standards. The orthoimages mosaics were obtained using the direct georeferencing method while applying the different sets of Interior Orientation Parameter (obtained from the performed calibrations procedures), and the different estimated boresight angles. The results showed that the orthoimages mosaics met the predetermined criteria, and demonstrated the using potential of the orthoimages methodology production without using control points in object space.

Keywords: Direct georeferencing. Camera calibration. Low-cost digital camera. On-the-Job calibration. Aerial Laser Scanning System.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 -	ELEMENTOS DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO.....	8
FIGURA 2 -	ESQUEMATIZAÇÃO DO VOO (CAMPOS MISTURADOS).....	10
FIGURA 3 -	MODELOS DE ESPELHO DE VARREDURA LASER	17
FIGURA 4 -	TIPOS DE VARREDURA A LASER.....	18
FIGURA 5 -	LARGURA DA FAIXA DE RECOBRIMENTO	19
FIGURA 6 -	MÚLTIPLOS RETORNOS DO PULSO EMITIDO	20
FIGURA 7 -	LIMITAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE VARREDURA PELA ALTURA DE VOO	21
FIGURA 8 -	LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO.....	24
FIGURA 9 -	PONTOS PRÉ-SINALIZADOS.....	25
FIGURA 10 -	PONTOS FOTOIDENTIFICÁVEIS.....	25
FIGURA 11 -	PONTOS DE APOIO LEVANTADOS NA ÁREA DE ESTUDO DE PONTA GROSSA	26
FIGURA 12 -	PONTOS DE APOIO LEVANTADOS NA ÁREA DE ESTUDO DE TELÊMACO BORBA.....	28
FIGURA 13 -	ORIENTAÇÃO DAS FAIXAS DE VOO EM PONTA GROSSA	30
FIGURA 14 -	AEROLEVANTAMENTO NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO INDEPENDENTE.....	30
FIGURA 15 -	AEROLEVANTAMENTO EM TELÊMACO BORBA	32
FIGURA 16 -	DIREÇÃO DAS FAIXAS DE VOO NA ÁREA DE ESTUDO EM TELÊMACO BORBA.....	32
FIGURA 17 -	FLUXOGRAMA DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS DO SLSA.....	33
FIGURA 18 -	FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DA PESQUISA	34
FIGURA 19 -	SENSORES INSTALADOS NA AERONAVE.....	36
FIGURA 20 -	VISTA DOS SENSORES POR BAIXO DA AERONAVE.....	36
FIGURA 21 -	CAIXA ACRÍLICA ADAPTADA PARA INSTALAÇÃO DA CÂMARA.....	36
FIGURA 22 -	MEDIÇÕES NO SENSOR DO SLSA.....	40
FIGURA 23 -	MEDIÇÕES NA ANTENA GNSS	40
FIGURA 24 -	MEDIÇÕES NA CÂMARA.....	40

FIGURA 25 -	LOCALIZAÇÃO DO CP.....	41
FIGURA 26 -	MEDIÇÕES COM A ESTAÇÃO TOTAL.....	42
FIGURA 27 -	TRANSLAÇÃO E ORIENTAÇÃO DO REFERENCIAL DAS IMAGENS	46
FIGURA 28 -	FLUXOGRAMA PARA OBTENÇÃO DE UM MOSAICO DE ORTOIMAGENS.....	49
FIGURA 29 -	LEITURA DOS PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS NAS IMAGENS	50
FIGURA 30 -	DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS E DAS IMAGENS NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO EM PONTA GROSSA.....	55
FIGURA 31 -	CURVA DA DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA (CALIBRAÇÃO INDEPENDENTE).....	57
FIGURA 32 -	CURVA DA DISTORÇÃO DESCENTRADA (CALIBRAÇÃO INDEPENDENTE).....	57
FIGURA 33 -	GRÁFICOS DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO (CALIBRAÇÃO AÉREA INDEPENDENTE)	59
FIGURA 34 -	DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS E DAS IMAGENS NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO EM TELÊMACO BORBA	62
FIGURA 35 -	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS PONTOS DE APOIO UTILIZADOS EM CADA EXPERIMENTO DE CALIBRAÇÃO AÉREA EM SERVIÇO	63
FIGURA 36 -	CURVAS DA DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA PARA OS CINCO EXPERIMENTOS (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)	65
FIGURA 37 -	CURVAS DA DISTORÇÃO DESCENTRADA PARA OS CINCO EXPERIMENTOS (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO).....	66
FIGURA 38 -	GRÁFICOS DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO UTILIZADOS EM CADA EXPERIMENTO DE CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO	74
FIGURA 39 -	GRÁFICOS DAS DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO UTILIZADOS EM CADA EXPERIMENTO DE CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO	75
FIGURA 40 -	DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO, ORIENTAÇÃO DAS FAIXAS DE VOO, PROJEÇÃO DAS	

	IMAGENS NA ÁREA DE ESTUDO E ÁREA DEFINIDA PARA OBTENÇÃO DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS	78
FIGURA 41 -	REGIÕES UTILIZADAS DE CADA ORTOIMAGEM NA COMPOSIÇÃO DO MOSAICO	81
FIGURA 42 -	EXEMPLO DE UMA ÁREA DE ADJACÊNCIA ENTRE DUAS ORTOIMAGENS OBTIDAS PELOS DIFERENTES PROCEDIMENTOS DE APLICAÇÃO DA ORIENTAÇÃO RELATIVA.....	82
FIGURA 43 -	GRÁFICOS DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DOS MOSAICOS DE ORTOIMAGENS	83
FIGURA 44 -	GRÁFICOS DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DOS MOSAICOS DE ORTOIMAGENS COM A REFERÊNCIA DOS LIMITES DO PEC PARA A ESCALA 1:2.000	86

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	ACURÁCIA DOS SISTEMAS INTEGRADOS GNSS/IMU	17
TABELA 2 -	ESPECIFICAÇÕES ALTM 2050	22
TABELA 3 -	ESPECIFICAÇÕES DA CÂMARA DIGITAL	23
TABELA 4 -	PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO DO VOO DE CALIBRAÇÃO AÉREA INDEPENDENTE	29
TABELA 5 -	PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO DO VOO DE CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO	31
TABELA 6 -	COORDENADAS OBTIDAS COM O LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO	53
TABELA 7 -	POSIÇÕES RELATIVAS DO CP DA CÂMARA E A ANTENA GNSS AO CENTRO DO ESPELHO DE VARREDURA DO SLSA	54
TABELA 8 -	DESCRIPTIVO DAS FAIXAS DE VOO REALIZADAS NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO EM PONTA GROSSA	55
TABELA 9 -	POI OBTIDOS COM O PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO AÉREA INDEPENDENTE	56
TABELA 10 -	POI TRANSFORMADOS PARA O SISTEMA DE UNIDADES EM PIXEL (CALIBRAÇÃO INDEPENDENTE).	56
TABELA 11 -	TESTE ESTATÍSTICO DO QUI-QUADRADO (χ^2) (CALIBRAÇÃO INDEPENDENTE)	58
TABELA 12 -	REMQ DOS RESÍDUOS (CALIBRAÇÃO AÉREA INDEPENDENTE)	58
TABELA 13 -	MÉDIA E REMQ DAS DISCREPÂNCIAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO (CALIBRAÇÃO AÉREA INDEPENDENTE)	58
TABELA 14 -	MATRIZ DE CORRELAÇÃO DOS POI (CALIBRAÇÃO INDEPENDENTE)	60
TABELA 15 -	MÉDIA ABSOLUTA DAS MATRIZES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMARA E OS POE DAS IMAGENS (CALIBRAÇÃO INDEPENDENTE)	60

TABELA 16 -	FAIXAS DE VOO REALIZADAS NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO AÉREA EM TELÊMACO BORBA	62
TABELA 17 -	EXPERIMENTOS DE CALIBRAÇÃO AÉREA EM SERVIÇO	63
TABELA 18 -	POI OBTIDOS COM O PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO AÉREA EM SERVIÇO	64
TABELA 19 -	POI TRANSFORMADOS PARA O SISTEMA DE UNIDADES EM PIXEL (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)	65
TABELA 20 -	MATRIZ DE CORRELAÇÃO DOS POI DO EXPERIMENTO 1 (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)	66
TABELA 21 -	MATRIZ DE CORRELAÇÃO DOS POI DO EXPERIMENTO 2 (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)	67
TABELA 22 -	MATRIZ DE CORRELAÇÃO DOS POI DO EXPERIMENTO 3 (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)	67
TABELA 23 -	MATRIZ DE CORRELAÇÃO DOS POI DO EXPERIMENTO 4 (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)	68
TABELA 24 -	MATRIZ DE CORRELAÇÃO DOS POI DO EXPERIMENTO 5 (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)	68
TABELA 25 -	MÉDIA ABSOLUTA DAS MATRIZES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMARA E OS POE DAS IMAGENS – EXPERIMENTO 1 (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)	69
TABELA 26 -	MÉDIA ABSOLUTA DAS MATRIZES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMARA E OS POE DAS IMAGENS – EXPERIMENTO 2 (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)	69
TABELA 27 -	MÉDIA ABSOLUTA DAS MATRIZES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMARA E OS POE DAS IMAGENS – EXPERIMENTO 3 (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)	70
TABELA 28 -	MÉDIA ABSOLUTA DAS MATRIZES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMARA E OS POE DAS IMAGENS – EXPERIMENTO 4 (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)	70
TABELA 29 -	MÉDIA ABSOLUTA DAS MATRIZES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMARA E OS POE DAS IMAGENS – EXPERIMENTO 5 (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)	71

TABELA 30 -	TESTE ESTATÍSTICO DO QUI-QUADRADO (χ^2) (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)	72
TABELA 31 -	REMQ DOS RESÍDUOS PARA OS EXPERIMENTOS DE CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO	72
TABELA 32 -	REMQ DAS DISCREPÂNCIAS PARA OS EXPERIMENTOS DE CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO	73
TABELA 33 -	POI OBTIDOS PELOS DOIS PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO AÉREA.	76
TABELA 34 -	DESCRIPTIVO DAS FAIXAS DE VOO UTILIZADAS NA GERAÇÃO DAS ORTOIMAGENS DA AÉREA DE ESTUDO EM TELÊMACO BORBA.	78
TABELA 35 -	CONJUNTOS DE PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO RELATIVA.	79
TABELA 36 -	PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO RELATIVA OBTIDOS PARA CADA INSTANTE DE AQUISIÇÃO DAS IMAGENS AÉREAS	80
TABELA 37 -	REMQ DAS DISCREPÂNCIAS POR COMPONENTE PLANIMÉTRICA DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DOS MOSAICOS DE ORTOIMAGENS	83
TABELA 38 -	VALORES LIMITES ADMITIDOS PELO PEC PARA A ESCALA 1:2.000	84
TABELA 39 -	MÉDIA E DESVIO PADRÃO PARA CADA COMPONENTE PLANIMÉTRICA DOS MOSAICOS DE ORTOIMAGENS	85
TABELA 40 -	MÉDIAS E DESVIOS PADRÃO DOS VETORES RESULTANTES PLANIMÉTRICOS DOS MOSAICOS DE ORTOIMAGENS	85
TABELA 41 -	VALORES LIMITES ADMITIDOS PELO PEC PARA AS ESCALAS 1:500, 1:1.000, 1:1.500 E 1:2000	87
TABELA 42 -	AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA PLANIMÉTRICA DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 1 SEGUNDO O PEC	89
TABELA 43 -	AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA PLANIMÉTRICA DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 2 SEGUNDO O PEC	89

TABELA 44 -	AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA PLANIMÉTRICA DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 3 SEGUNDO O PEC	90
TABELA 45 -	AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA PLANIMÉTRICA DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 4 SEGUNDO O PEC	90
TABELA 46 -	AVALIAÇÃO DA PRECISÃO PLANIMÉTRICA DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 1 SEGUNDO O PEC	92
TABELA 47 -	AVALIAÇÃO DA PRECISÃO PLANIMÉTRICA DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 2 SEGUNDO O PEC	93
TABELA 48 -	AVALIAÇÃO DA PRECISÃO PLANIMÉTRICA DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 3 SEGUNDO O PEC	93
TABELA 49 -	AVALIAÇÃO DA PRECISÃO PLANIMÉTRICA DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 4 SEGUNDO O PEC	94

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVO GERAL	4
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3	JUSTIFICATIVA	5
4	REVISÃO DE LITERATURA	6
4.1	GEORREFERENCIAMENTO DIRETO	6
4.2	CALIBRAÇÃO DO SISTEMA	8
4.2.1.	Calibração Interior da câmara	9
4.2.1.1.	Procedimentos de calibração	9
4.2.1.2.	Parâmetros de Orientação Interior	11
4.2.2.	Calibração dos parâmetros de instalação	13
4.3	CÂMARAS DE BAIXO CUSTO NA AEROFOTOGRAMETRIA	15
4.4	PERFILAMENTO AÉREO A LASER	16
5	MATERIAIS	22
5.1	SENSORES AEROTRANSPORTADOS	22
5.2	ÁREAS DE ESTUDO	23
5.3	LEVANTAMENTOS DE CAMPO	24
5.3.1.	Campo para calibração aérea independente	25
5.3.2.	Área de estudo para calibração em serviço e avaliação das ortoimagens	27
5.4	AEROLEVANTAMENTOS	28
5.4.1.	Planejamento e aquisição dos dados para a calibração aérea independente	28
5.4.2.	Aquisição dos dados para a calibração em serviço e obtenção das ortoimagens	31
5.5	DADOS PROVENIENTES DO SLISA	33
6	METODOLOGIA	34
6.1	INTEGRAÇÃO DA CÂMARA AO SLISA	34
6.1.1.	Adaptação da câmara na plataforma aérea	35
6.1.2.	Determinação dos parâmetros de instalação	37
6.1.2.1.	Posições Relativas	38

6.1.3.	Obtenção das posições das estações de exposição da câmara	44
6.2	CALIBRAÇÃO DA CÂMARA	45
6.2.1.	Leituras dos pontos nas imagens	45
6.2.2.	Determinação dos POI	46
6.2.3.	Análise e avaliação das calibrações	47
6.3	OBTENÇÃO E AVALIAÇÃO DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS	48
6.3.1.	Determinação dos parâmetros da orientação relativa ($\Delta\kappa, \Delta\omega, \Delta\phi$)	49
6.3.2.	Avaliação dos mosaicos de ortomagens.....	50
7	RESULTADOS	53
7.1	INTEGRAÇÃO DOS SENSORES	53
7.2	CALIBRAÇÃO AÉREA INDEPENDENTE	54
7.3	CALIBRAÇÃO AÉREA EM SERVIÇO	61
7.3.1.	Experimentos de calibração aérea em serviço	62
7.4	POI OBTIDOS PELOS DIFERENTES PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO	76
7.5	MOSAICOS DE ORTOIMAGENS.....	77
7.5.1.	Orientação relativa da câmara.....	78
7.5.2.	Obtenção dos mosaicos de ortomagens.....	80
7.5.3.	Exatidão dos mosaicos de ortomagens	82
7.5.4.	Avaliação dos mosaicos de ortomagens.....	84
7.5.4.1.	Avaliação da acurácia dos mosaicos de ortomagens	87
7.5.4.2.	Avaliação da precisão dos mosaicos de ortomagens	91
8	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	96
	REFERÊNCIAS	99
	APÊNDICES	105

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos foram elaborados novos métodos e técnicas visando maior automação dos processos envolvidos na extração de informações espaciais a partir de imagens aéreas. Dentre os quais é possível destacar a metodologia de georreferenciamento direto, a qual se tornou viável com o desenvolvimento de sistemas de posicionamento e orientação de alta precisão e acurácia. No georreferenciamento direto os Parâmetros de Orientação Exterior (POE) das imagens são obtidos no instante de tomada das mesmas, fato que proporciona vantagens econômicas, especialmente no mapeamento de áreas com pouco controle no espaço objeto. Destaca-se que no emprego desta metodologia devem ser consideradas as relações espaciais e temporais entre os sensores envolvidos e suas medições derivadas, e também a calibração de todo o sistema é um item essencial (HABIB; KERSTING, 2010).

Segundo Habib et al. (2006), pequenas alterações dos Parâmetros de Orientação Interior (POI) acarretam na perda de qualidade geométrica nas determinações espaciais com o emprego do georreferenciamento direto, diferentemente do georreferenciamento indireto onde tais alterações são compensadas nas determinações dos POE.

De acordo com Eisenhart (1963), “o processo de calibração deve ser tão próximo quanto possível das condições normais de uso do equipamento”. Esse princípio pode justificar, nos estudos realizados por Martins (2010), a observação de discrepâncias planimétricas maiores que as esperadas nas ortoimagens obtidas pelo método de georreferenciamento direto, uma vez que a calibração da câmara utilizada na pesquisa foi realizada através de um procedimento em solo.

Outro item importante a ser atentado durante o processo de calibração da câmara são as correlações observadas entre os POI e os POE, quando certas condições geométricas requeridas nos processos de calibração não são atendidas. Os métodos de calibração, como por exemplo, das câmaras convergentes (BROWN, 1971) e o método dos campos misturados (MERCHANT, 1972), estabelecem condições mínimas para tomada das imagens de maneira a eliminar as dependências lineares entre pares de coeficientes, como por exemplo, a tomada de imagens oblíquas, a realização de faixas transversais, o imageamento de áreas com

relevo acidentado, etc. Tais condições muitas vezes não são passíveis de atendimento quando desejamos calibrar a câmara para cada recobrimento aéreo, o que ocorre com a calibração em serviço, por exemplo.

Marcato et al. (2009) propuseram a fixação da posição (X_0, Y_0, Z_0) do Centro Perspectivo (CP) da câmara para o instante de tomada de cada imagem utilizada para a calibração, e afirmaram que dessa forma são eliminadas as dependências lineares entre os coeficientes $c, x_{pp}, y_{pp}, X_0, Y_0$ e Z_0 , resultando na determinação dos POI com maior exatidão. Durante o processo de calibração, tal fixação pode ser realizada aplicando injunções nas posições das estações de exposição da câmara, com dados provenientes de um equipamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*).

Segundo Mitishita et al. (2011), experimentos realizados com POI provenientes de uma calibração realizada em solo e independente, ou seja, realizada numa área e/ou época diferente da realização do mapeamento, acarretaram em discrepâncias nos pontos de verificação superiores as esperadas, o que pode ser resolvido com a realização de uma calibração em serviço devido ao procedimento modelar as imprecisões nos parâmetros envolvidos.

Tendo em vista que a calibração da câmara é um item essencial nos trabalhos fotogramétricos, principalmente com o emprego do georreferenciamento direto, questiona-se se ao calibrarmos uma câmara através de um procedimento aéreo em condições mais próximas do uso do equipamento conforme recomendado por Eisenhart (1963), porém num campo de calibração independente, os POI provenientes desta proporcionariam a correção geométrica de imagens equivalente a dos POI provenientes de uma calibração em serviço. Ressalta-se que os procedimentos de calibração, principalmente em serviço, se tornaram mais praticáveis uma vez que as posições da câmara no instante de aquisição das imagens durante o aerolevantamento podem ser obtidas diretamente, com utilização de um receptor GNSS na aeronave, por exemplo.

Nesta pesquisa foram avaliados dois procedimentos de calibração aérea, um independente e outro em serviço, e também, numa abordagem mais prática, foram analisadas as influências dos POI provenientes de ambos na acurácia e precisão de ortoimagens obtidas pelo método de georreferenciamento direto. O critério de avaliação geométrica das ortoimagens utilizado foi o Padrão de Exatidão

Cartográfico (PEC), o qual foi estabelecido pelo Decreto 89.817 de 20 de junho de 1984.

A presente pesquisa também contemplou a integração física de uma câmara digital de baixo custo num Sistema Laser Scanner Aerotransportado (SLSA), e a determinação dos parâmetros de instalação de ambos os sensores.

2 OBJETIVO GERAL

Avaliar dois procedimentos de calibração aérea de uma câmara digital de baixo custo integrada a um SLISA, aplicando os POI provenientes de ambos na obtenção de ortoimagens pelo método de georreferenciamento direto.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Integrar a câmara digital ao SLISA;
2. Realizar dois procedimentos de calibração aérea, um independente e outro em serviço, e analisar e comparar os resultados obtidos; e
3. Analisar as influências dos POI das calibrações realizadas, na qualidade geométrica de ortoimagens obtidas pelo método de georreferenciamento direto.

3 JUSTIFICATIVA

Devido a disseminação do uso dos equipamentos integrados GNSS/SMI na Aerofotogrametria, a calibração de câmaras voltou a ganhar destaque no meio acadêmico/científico, tendo em vista a grande importância desta no emprego do georreferenciamento direto. Além deste, outro fator que impulsionou os recentes estudos de calibração foi a crescente utilização de câmaras de baixo custo para a realização de mapeamentos aéreos. As câmaras de baixo custo não são construídas com a finalidade de obtenção de informações métricas, por esse motivo provém imagens com maiores distorções que câmaras fotogramétricas.

Tendo em vista o uso de uma câmara digital de baixo custo e o emprego do georreferenciamento direto, buscou-se determinar uma melhor solução de calibração desta integrada a um SLISA. Esta solução deve buscar ponderar, previamente à execução de projetos de Aerofotogrametria, o melhor procedimento a ser empregado com base na relação custo-benefício.

Alguns dos benefícios provenientes da integração entre os dois sensores, laser e câmara, são: a utilização indireta dos sistemas GNSS/SMI do SLISA no georreferenciamento direto das imagens aéreas; a utilização da nuvem de pontos do SLISA como controle no espaço objeto; a não variação temporal entre as informações adquiridas; e uma redução de custos devido a não necessidade de realizar dois voos distintos para aquisição dos dados.

Martins (2010) estudou a integração de uma câmara digital de baixo custo num SLISA visando a geração de ortoimagens na escala de representação cartográfica 1:2.000, porém observou discrepâncias significativas quando avaliadas as exatidões obtidas com tais ortoimagens. Uma justificativa possível para este fato apontado por Martins (2010) foi justamente à calibração da câmara, o que também motiva o enfoque da presente pesquisa.

4 REVISÃO DE LITERATURA

Na revisão de literatura segue uma explanação acerca do georreferenciamento direto e a calibração do sistema, necessária para o emprego da metodologia. Abordam-se também o uso de câmaras digitais de baixo custo na Aerofotogrametria e o perfilamento aéreo a laser.

4.1 GEORREFERENCIAMENTO DIRETO

O georreferenciamento direto está consolidado na combinação do GNSS e o SMI (MARTINS, 2010). O GNSS oferece alta acurácia no posicionamento absoluto e informações de velocidade, mas a sua acurácia relativa é dependente da qualidade dos dados e aproximação das observações. O SMI, por outro lado, provê elevada acurácia relativa para a informação da posição, velocidade e de atitude, mas a acurácia absoluta diminui com o tempo (SCHWARZ, 1995).

Além da vantagem econômica, devido à possibilidade de um mapeamento quase isento de controle, a orientação direta do sensor supera as limitações existentes das aerotriangulações convencionais baseadas em imagens, como o mapeamento de regiões costeiras, florestas, desertos e áreas montanhosas onde existe a dificuldade de se implantar pontos de controle e também de se identificarem pontos homólogos nas aéreas de superposição de imagens adjacentes. Atualmente, os modernos sistemas de mapeamento aéreo e terrestre consistem em sistemas multi-sensores, normalmente abrangendo um GNSS/SMI e um ou dois tipos de sensores de imagem: câmaras digitais e um sistema de varredura a laser. O uso de sistemas de multi-câmaras, para obter um recobrimento maior do espaço objeto, é também uma tendência no cenário moderno do mapeamento fotogramétrico (KERSTING, 2011).

O modelo matemático comumente utilizado no georreferenciamento direto é (SKALLOUD, 1999):

$$r_i^m = r_{GNSS/SMI}^m(t) + R_b^m(t)[S_i R_c^b r_i^c(t) + a^b] \quad (1)$$

Onde

- r_i^m : vetor de coordenadas a ser computado no espaço objeto para um ponto específico (i);
- $r_{GNSS/SMI}^m(t)$: vetor contendo as coordenadas da origem do SMI no espaço objeto, determinado pela integração GNSS/SMI;
- $R_b^m(t)$: matriz de rotações entre o SMI e o espaço objeto, determinada pela integração GNSS/SMI;
- S_i : fator de escala entre a imagem e o sistema de coordenadas no espaço objeto para um ponto específico (i), geralmente determinado pelo processamento de pares estereoscópicos de imagens;
- R_c^b : é a matriz de rotação relativa entre a câmera e o SMI;
- $r_i^c(t)$: é o vetor de coordenadas observadas no espaço imagem para uma específica imagem (i) e um ponto (i); e
- a^b : é o vetor de translação relativa entre o centro de referência do SMI e o CP da câmara no referencial do SMI, geralmente determinado por medições topográficas como parte do processo de calibração.

A relação entre os componentes descritos na equação (1) segue ilustrada na Figura 1.

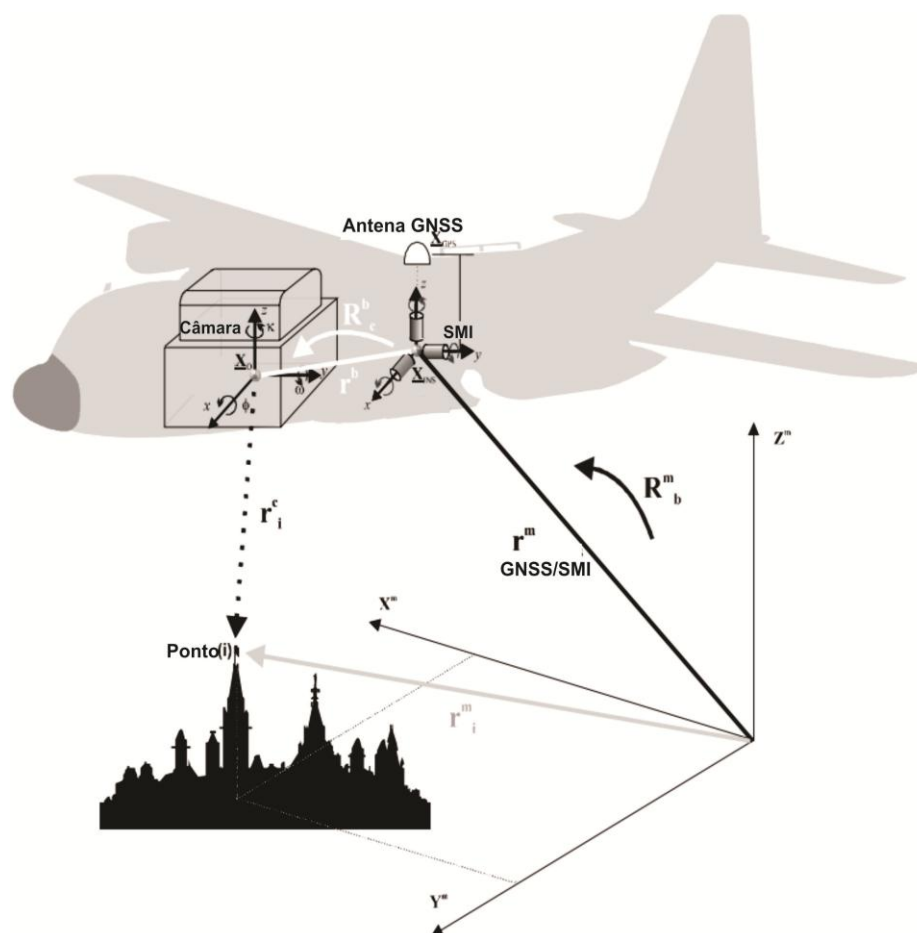


FIGURA 1 - ELEMENTOS DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO

FONTE: Adaptado pelo autor (SKALLOUD, 1999)

4.2 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA

A calibração de todos os sensores utilizados num sistema integrado é um passo prioritário e essencial para missões de aerolevantamento visando o emprego do georreferenciamento direto. A calibração do sistema pode ser dividida em duas partes: calibração individual dos sensores e calibração entre os sensores. Na calibração individual dos sensores, pode-se destacar, por exemplo, para uma câmara, a determinação dos POI. Já a calibração entre os sensores envolve as posições e orientação relativas entre a câmara e os sensores de navegação, e as compensações para a sincronização entre a transmissão e recepção dos dados entre os diversos equipamentos (SKALLOUD, 1999).

4.2.1. Calibração Interior da câmara

A calibração interior de uma câmara é estabelecida pela determinação de um conjunto de parâmetros, denominados de POI. Os POI permitem recuperar a geometria projetiva da câmara no instante de tomada de uma imagem e a determinação destes se dá através de um procedimento de calibração, o qual pode ser de laboratório ou de campo.

4.2.1.1. Procedimentos de calibração

Os procedimentos de calibração em laboratório no geral são empregados pelas empresas fabricantes de câmaras fotogramétricas. Destes podemos destacar o método do multicolimador e o método do goniômetro. Devido às câmaras fotogramétricas serem submetidas a procedimentos de calibração periódicos, os métodos de laboratório não se tornam muito viáveis, uma vez que a câmara deve ser enviada ao fabricante acarretando em maiores custos e na indisponibilidade do equipamento por um período maior de tempo.

Face a estas questões os métodos de campo são comumente empregados, principalmente nos procedimentos de calibração periódica e na determinação dos POI de câmaras de baixo custo. Entre os procedimentos de calibração em campo podemos destacar o método das câmaras convergentes (BROWN, 1971) e o método dos campos misturados (MERCHANT, 1972). Ambos estabelecem condições mínimas para tomada das imagens de maneira a eliminar as dependências lineares entre pares de coeficientes, como por exemplo, a tomada de imagens oblíquas, a realização de faixas transversais, o imageamento de áreas com relevo acidentado, etc.

Dentre os métodos de calibração existentes, de acordo com Andrade (2003), o método das câmaras convergentes é o de mais fácil execução. O método baseia-se na tomada de imagens com alto grau de convergência e é comumente empregado no procedimento de calibração de câmaras de baixo custo devido à facilidade de realizar o procedimento em solo.

No método dos campos misturados normalmente é utilizado um campo de calibração acidentado com variação altimétrica equivalente a pelo menos 20% da altura de voo (LEIGH, 1973, *apud* ANDRADE; OLIVAS, 1981). São necessários pontos de apoio bem distribuídos na área, inclusive nos trechos mais elevados, o que dificulta o emprego da metodologia. A fim de separar os parâmetros das distorções radial simétrica e descentrada, são realizadas duas faixas de voo com 90° de azimute uma em relação à outra.

O recobrimento aéreo para a calibração utiliza geralmente quatro faixas, sendo tomadas de duas em duas em sentidos opostos e ortogonais (FIGURA 2) (CORTÊS, 2010).

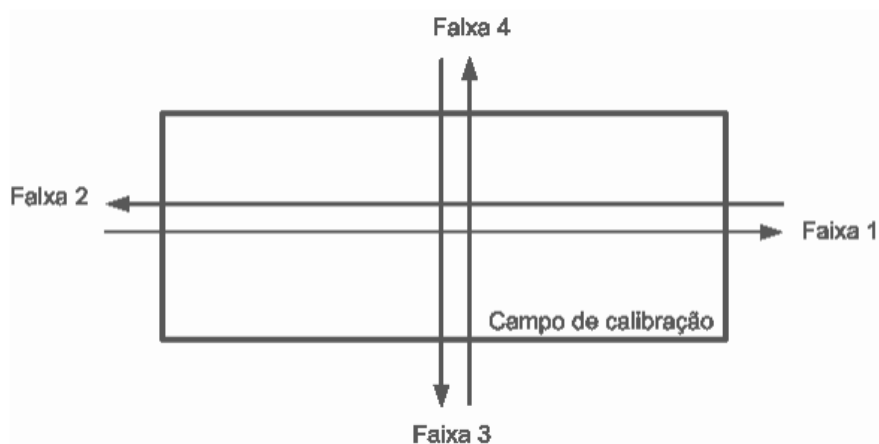


FIGURA 2 - ESQUEMATIZAÇÃO DO VOO (CAMPOS MISTURADOS).

FONTE: (CORTÊS, 2010)

Os procedimentos de calibração de câmaras também podem ser classificados como:

- Independente, onde os POI são determinados numa área e/ou época diferente da qual os mesmos serão utilizados;
- Em serviço, onde é empregado um ajustamento por feixes de raios com parâmetros adicionais, e a área imageada é composta por pontos de apoio e condições que permitam a determinação dos POI; e
- Auto-calibração, onde não é necessário nenhum apoio no espaço objeto.

Brown (1989, citado por CLARK; FRYER, 1998) discutiu os critérios que precisam ser atendidos para a realização de uma bem sucedida auto-calibração: uma única câmera deve ser utilizada para tomar ao menos três imagens do espaço objeto; tanto a geometria interior quanto o ponto a ser medido no espaço objeto devem permanecer estáveis durante o processo de medição; a rede fotogramétrica deve ser rígida; ao menos uma imagem deve ter um ângulo de rotação em um dos eixos significativamente diferente dos demais; é necessário um elevado número de pontos e estes bem distribuídos. Desde que os requisitos relacionados sejam atendidos, Brown (1989) acrescenta que “uma calibração satisfatória pode ser realizada como uma parte integrante da triangulação sem a necessidade de nenhum controle”.

4.2.1.2. Parâmetros de Orientação Interior

Os parâmetros de orientação interior são obtidos através de um procedimento de calibração da câmara e os mesmos tem como objetivo a reconstrução da geometria projetiva do feixe de raios de luz que entra na câmara no momento da exposição. O conjunto de POI comumente utilizados, tratando-se de câmaras digitais são:

c : constante da câmara;

x_{pp}, y_{pp} : coordenadas do ponto principal;

K_1, K_2, K_3 : coeficientes da distorção radial simétrica; e

P_1, P_2 : coeficientes da distorção descentrada.

Outro conjunto de parâmetros que podemos destacar são os coeficientes de afinidade (A, B), que permitem modelar a não ortogonalidade e a diferença de escala entre os eixos “ x ” e “ y ” do sistema de coordenadas da imagem. Nos dias atuais as câmaras digitais possuem cada elemento sensor (pixel) quadrado apresentando a mesma escala nos dois eixos (x, y), fato que torna desnecessária a utilização de tais parâmetros.

O processo de pré-correção dos erros sistemáticos, o qual visa à recuperação da geometria projetiva de uma observação na imagem digital, pode ser realizado em duas etapas principais: a primeira é a transformação da observação, feita no referencial em pixels com origem no canto superior esquerdo da imagem (linha e coluna), para um referencial em mm com a origem no centro da imagem. A segunda etapa é a correção das distorções de lentes, através da aplicação dos parâmetros de calibração sobre as coordenadas originais de imagem (JUBANSKI; MITISHITA; BAHR, 2010). Na equação (2), $\delta r(k_{1,2,3})$ e $\delta d(P_{1,2})$ representam a correção das distorções radial simétrica e descentrada, respectivamente.

$$\begin{aligned} x_f &= x_i - x_{pp} - \delta r_x(k_{1,2,3}) - \delta d_x(P_{1,2}) \\ y_f &= y_i - y_{pp} - \delta r_y(k_{1,2,3}) - \delta d_y(P_{1,2}) \end{aligned} \quad (2)$$

Os valores de “ x_f ” e “ y_f ” são as coordenadas referidas ao referencial fotogramétrico, “ x_i ” e “ y_i ” são as coordenadas referidas ao referencial do centro da imagem e “ x_{pp} ” e “ y_{pp} ” são as coordenadas do ponto principal. Ressalta-se que as equações $\delta r(k_{1,2,3})$ e $\delta d(P_{1,2})$ são obtidas com os valores de “ x ” e “ y ” já corrigidos para a posição do ponto principal da imagem (x_{pp}, y_{pp}), conforme as equações apresentadas a seguir.

$$\begin{aligned} \delta r_x(k_{1,2,3}) &= (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)x \\ \delta r_y(k_{1,2,3}) &= (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)y \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \delta d_x(P_{1,2}) &= P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy \\ \delta d_y(P_{1,2}) &= 2P_1xy + P_2(r^2 + 2y^2) \end{aligned} \quad (4)$$

Onde

$$x = x_i - x_{pp}$$

$$y = y_i - y_{pp}$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

4.2.2. Calibração dos parâmetros de instalação

Segundo Habib e Kersting (2010), com o emprego do georreferenciamento direto é necessário, além da calibração da câmara, a calibração dos parâmetros de instalação. Ressalta-se que desvios em tais parâmetros não são compensados pelos parâmetros de orientação exterior, e a confiança nestes é fundamental a fim de se obter a reconstrução precisa do espaço objeto. Isso ocorre devido ao fato de que a orientação direta do sensor é um procedimento de extrapolação e eventuais imprecisões nos POE, nos POI ou nos parâmetros de instalação são propagadas diretamente para o espaço objeto (HABIB; SHENK, 2001).

Os parâmetros de instalação são compostos pelas posições e orientações relativas entre os sensores e os sistemas GNSS/SMI. De acordo com Skaloud (1995), o vetor de translação entre o CP da câmara, a origem do SMI, e o centro de fase da antena GNSS pode ser determinado por um levantamento topográfico. Já a determinação da matriz de orientação relativa (ΔR_b^c) entre a câmara e o SMI é mais complicada de ser determinada, uma vez que os eixos direcionais em ambos os equipamentos não podem ser fisicamente observados, havendo assim a necessidade de serem determinados indiretamente através de um voo de calibração. A equação utilizada para determinar a matriz de orientação relativa entre a câmara e o SMI é (SKALOUD, 1995):

$$M_1^c = \Delta R_b^c \cdot R_1^b \quad (5)$$

Onde, M_1^c é a matriz de rotação entre o espaço objeto e o espaço imagem, ΔR_b^c é a matriz de orientação relativa entre a câmara e o SMI, e R_1^b é a matriz das rotações entre o espaço objeto e o SMI. Quando utilizado um sistema de projeções cartográficas, M_1^c assim como R_1^b estão referidos a um sistema de referência local,

consequentemente ΔR_b^c pode ser determinado pela equação (5), através da multiplicação de M_1^c pela transposta de R_1^b (propriedade da matriz ortogonal, por exemplo, transposição igual à inversão). Três ângulos de rotação $\Delta\varphi$, $\Delta\theta$, e $\Delta\alpha$ podem ser extraídos de ΔR_b^c utilizando as equações mostradas a seguir (SKALLOUD, 1995).

$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= \text{sen}^{-1}(-R_{13}) \\ \Delta\theta &= \text{tag}^{-1}\left(\frac{R_{23}}{R_{33}}\right) \\ \Delta\alpha &= \text{tag}^{-1}\left(\frac{R_{12}}{R_{11}}\right)\end{aligned}\tag{6}$$

Onde:

$$\begin{aligned}R_{13} &= -\text{sen}\phi \\ R_{23} &= \text{sen}\omega \cos \phi \\ R_{33} &= \cos \omega \cos \phi \\ R_{12} &= \cos \phi \text{sen}\kappa \\ R_{11} &= \cos \phi \cos \kappa\end{aligned}$$

Os elementos supra indicados são obtidos da matriz das rotações “ R ” (7).

$$\begin{aligned}R &= R_x(\omega).R_y(\phi).R_k(\kappa) = \\ &\begin{pmatrix} \cos \phi \cos \kappa & \cos \phi \text{sen} \kappa & -\text{sen} \phi \\ \text{sen} \omega \text{sen} \phi \cos \kappa - \cos \omega \text{sen} \kappa & \text{sen} \omega \text{sen} \phi \text{sen} \kappa + \cos \omega \cos \kappa & \text{sen} \omega \cos \phi \\ \cos \omega \text{sen} \phi \cos \kappa + \text{sen} \omega \text{sen} \kappa & \cos \omega \text{sen} \phi \text{sen} \kappa - \text{sen} \omega \cos \kappa & \cos \omega \cos \phi \end{pmatrix}\end{aligned}\tag{7}$$

Diferentes ângulos de orientação relativa podem ser determinados para cada imagem aérea durante o aerolevantamento. Suas variações indicam o atual

desempenho da orientação do GNSS/SMI assumindo que a orientação da câmara possui desvios insignificantes.

4.3 CÂMARAS DE BAIXO CUSTO NA AEROFOTOGRAMETRIA

Diversos trabalhos recentes demonstram o potencial do uso de imagens aéreas obtidas por câmaras de baixo custo na extração de informações métricas (WARNER; GRAHAM; READ, 1996, PULLIVELLI, 2005, HARINTAKA et al., 2009). No processo de construção e montagem de uma câmara não métrica (de baixo custo), não existe a preocupação de manter fixa a geometria projetiva. A distância focal pode facilmente ser alterada pela movimentação do anel de focagem, em função da distância do objeto a ser fotografado. A impossibilidade de retornar à mesma distância focal, determinada no momento da calibração, altera os outros parâmetros de orientação interior e dificulta a exata recuperação da geometria projetiva.

As câmaras não métricas possuem outras características que podem modificar a geometria projetiva determinada num processo de calibração, tais como: sistemas de absorção de impacto que modificam a posição do elemento sensor em relação ao sistema de lentes; trocas de objetiva; e autofoco (CORTÊS, 2010).

O uso de câmaras de baixo custo na Aerofotogrametria ocorreu principalmente devido aos custos elevados das câmaras métricas, a possibilidade de instalar tais equipamentos em aeronaves de pequeno porte, inclusive Veículo Aéreo não Tripulado (VANT), e também devido à utilização de múltiplos sensores nos recobrimentos aéreos.

O método de georreferenciamento direto também facilitou o uso destas câmaras, uma vez que não exige um controle tão densificado no espaço objeto se comparado ao georreferenciamento indireto. O quadro que forma a imagem nas câmaras digitais de baixo custo (CMOS – *Complementary Metal Oxide Semiconductor* ou CCD – *Charged Coupled Device*) possui dimensões inferiores às câmaras aerofotogramétricas, o que resulta em um número maior de imagens no recobrimento de uma determinada área, e conseqüentemente, um número maior de apoio no espaço objeto quando empregado o georreferenciamento indireto.

Alguns trabalhos estudaram a estabilidade geométrica de câmaras de baixo custo (HABIB; MORGAN, 2005, LICHTI; HABIB; DETCHEV, 2009, CORTÊS, 2010), porém ressaltam que com o uso do georreferenciamento direto ainda são necessários estudos a fim de comprovar o potencial do uso destas em aplicações aerofotogramétricas.

4.4 PERFILAMENTO AÉREO A LASER

A tecnologia de perfilamento a laser, comumente conhecida como LiDAR (*Light Detection And Ranging*) ou LADAR (*Laser Detection And Ranging*), utilizada para fins de aerolevantamento, consiste no mapeamento tridimensional da superfície terrestre através do uso de um sensor laser dinâmico acoplado numa plataforma aérea.

O princípio de funcionamento do sistema está baseado na emissão de pulsos laser em direção à superfície física, os quais, após encontrarem algum obstáculo, retornam ao sensor. É considerado o intervalo de tempo entre a emissão e retorno de cada pulso para determinar a distância entre o sensor até o objeto (WEHR; LOHR, 1999). Por tratar-se de um equipamento que realiza as medições em movimento, são integrados a ele um sistema de posicionamento global por satélites GNSS e um SMI.

Numa etapa prévia a extração da nuvem de pontos, posterior ao perfilamento aéreo a laser, geralmente é aplicado um método DGNSS (*Differential Global Navigation Satellite System*) pós-processado visando à correção diferencial das posições da aeronave durante o aerolevantamento. Dessa forma a exatidão das determinações no espaço objeto obtidas pelo sistema podem variar entre 5 e 30 cm (MOSTAFA; HUTTON, 2001).

As posições e orientações do sensor são obtidas pelos sistemas integrados GNSS/SMI. A Tabela 1 apresenta a acurácia de alguns dos sistemas GNSS/SMI desenvolvidos e comercializados pela empresa Applanix Corp.

TABELA 1 - ACURÁCIA DOS SISTEMAS INTEGRADOS GNSS/IMU

POS AV	410 DGPS	410 Pós- processado	510 DGPS	510 Pós- processado	610 DGPS	610 Pós- processado
Posição (m)	0,5 – 2,0	0,05 – 0,30	0,5 – 2,0	0,05 – 0,30	0,5 – 2,0	0,05 – 0,30
Velocidade (m/s)	0,050	0,005	0,050	0,005	0,020	0,005
ω e ϕ (graus)	0,015	0,008	0,008	0,005	0,005	0,0025
K (graus)	0,050	0,025	0,050	0,008	0,030	0,0050

FONTE: Adaptado pelo autor (APPLANIX, 2009)

O sistema possui também um espelho de varredura óptico-mecânico, o qual realiza uma varredura transversal à direção de voo. Basicamente existem três tipos de espelhos de varredura utilizados nos sistemas de perfilamento aéreo a laser, são eles: espelho oscilador, varredura Palmer e polígonos de rotação (FIGURA 3). Tais espelhos resultam numa varredura do tipo “zig-zag”, modelos elípticos e linhas paralelas, respectivamente (FIGURA 4).

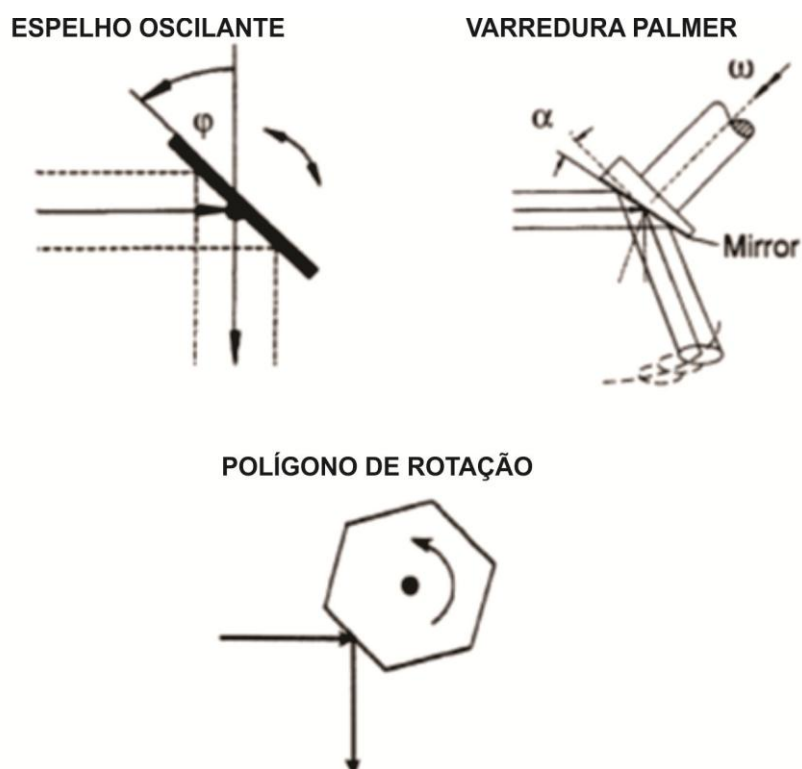


FIGURA 3 - MODELOS DE ESPELHO DE VARREDURA LASER

FONTE: (WEHR; LOHR, 1999)

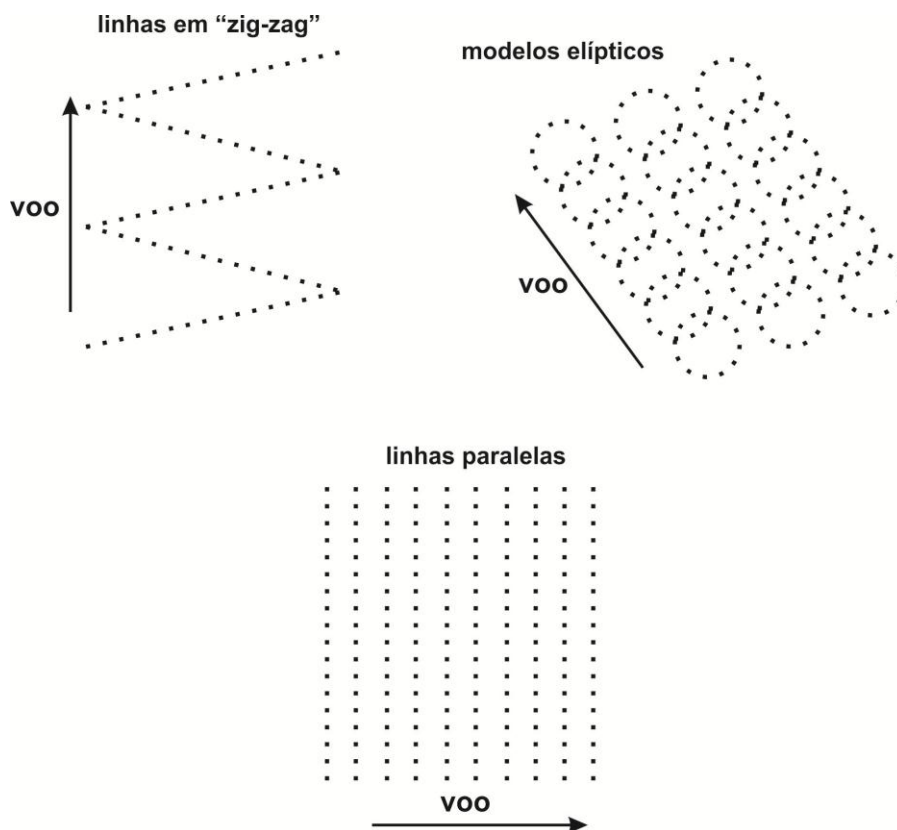


FIGURA 4 - TIPOS DE VARREDURA A LASER

FONTE: (DALMOLIN; SANTOS, 2003)

A largura da faixa de recobrimento é determinada conforme a configuração do ângulo de varredura e da altura de voo definidos previamente à realização do mapeamento. A angulação máxima de varredura e altura de voo do sensor é limitada conforme as especificações de cada equipamento. A seguir segue a equação empregada na determinação da largura da faixa de recobrimento.

$$L = 2H \tan(\beta) \quad (8)$$

Na equação (8) L corresponde a largura da faixa de recobrimento, H é igual a altura de voo, e β é igual a metade do ângulo total de varredura. Para melhor entendimento segue demonstrados os parâmetros na Figura 5.

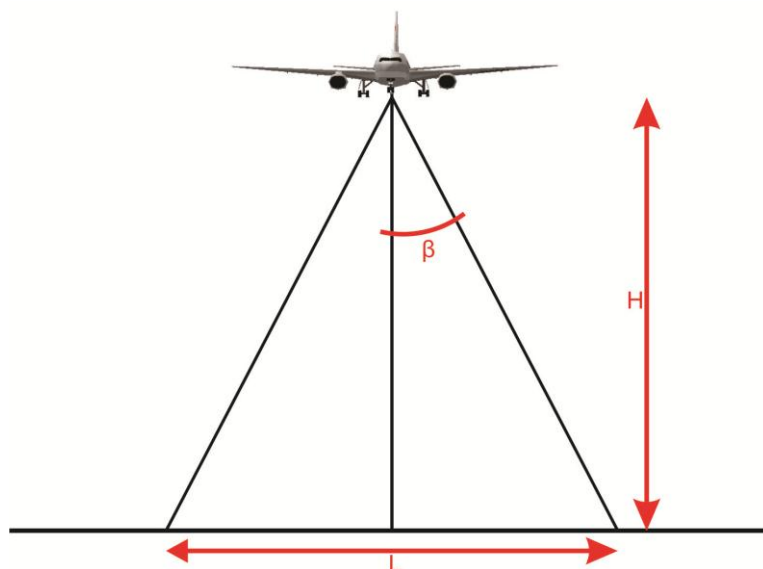


FIGURA 5 - LARGURA DA FAIXA DE RECOBRIMENTO

FONTE: O autor (2012)

O pulso laser tem a característica de divergir a medida que se propaga no meio, por esta razão, quando o mesmo é projetado no terreno representa uma determinada área, que varia conforme a altura de voo e o valor de divergência do feixe. A divergência do feixe é um parâmetro que exerce influência na detecção dos objetos. Nos sistemas atuais a divergência pode variar de 0,15 a 0,8 mrad. Para aplicações em áreas urbanas, quando é necessário modelar com o máximo de precisão as bordas das edificações, ou para mapeamento de áreas florestais, quando é desejável que o feixe tenha alta penetrabilidade, o valor da divergência deve ser pequeno. Já para mapeamento de linhas de transmissão de energia valores maiores de divergência devem ser utilizados para detectar pequenos objetos (BIN et al., 2008).

A divergência do pulso laser propicia que o feixe emitido encontre mais de um obstáculo durante o seu percurso (ver FIGURA 6), de maneira que podem ser obtidos múltiplos retornos para um único pulso emitido. Os equipamentos de varredura a laser mais atuais tem a capacidade de identificar esses múltiplos retornos e ainda todo o percurso do feixe emitido com a tecnologia denominada *full-waveform*.

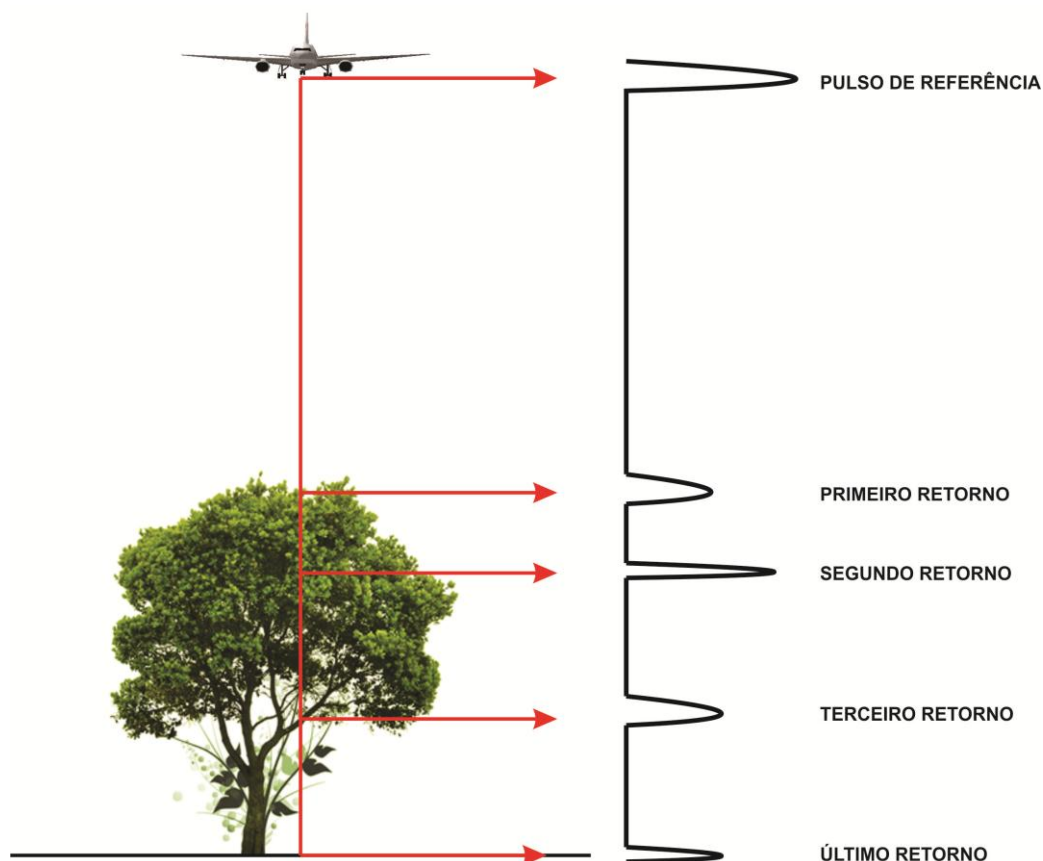


FIGURA 6 - MÚLTIPLOS RETORNOS DO PULSO EMITIDO

FONTE: O autor (2012)

Desde o ano de 2004, estão sendo comercializados sensores laser aerotransportados denominados de *full-waveform* (termo técnico ainda sem tradução para o português), os quais possuem a capacidade de armazenar a completa onda de retroespalhamento do pulso laser emitido. Isto provê informações adicionais sobre a estrutura e as propriedades físicas do retroespalhamento da superfície iluminada (MALLET; BRETAR, 2009).

A densidade de pontos resultante do perfilamento aéreo a laser depende do equipamento utilizado e das características do aerolevantamento. Os parâmetros de voo diretamente correlacionados com a densidade de pontos média resultante do aerolevantamento a laser são: a frequência de operação, o ângulo de varredura, a velocidade da aeronave e a altura de vôo (ZANDONÁ, 2006). Atualmente estão disponíveis comercialmente equipamentos com frequência de operação igual a 500 kHz, os quais podem proporcionar mais de 20 pontos por metro quadrado no espaço objeto, porém a configuração da frequência de operação é limitada pela altura de voo conforme ilustrado na Figura 7.

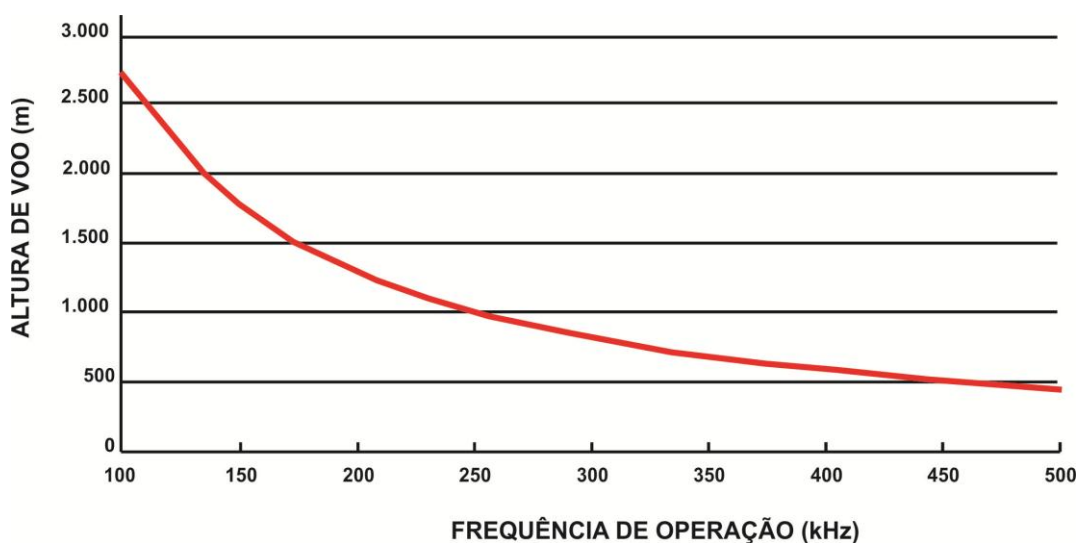


FIGURA 7 - LIMITAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE VARREDURA PELA ALTURA DE VOO

FONTE: Adaptado pelo autor (OPTECH INC., 2011)

Os sensores laser têm a capacidade de obter informações não apenas sobre a geometria dos objetos, mas também as sobre as características de reflectância da superfície terrestre no comprimento de onda do infravermelho próximo, entre 800 nm e 1550 nm. A maior parte dos sensores comercializados atualmente é capaz de armazenar a amplitude de retorno do pulso emitido, e um número crescente de sistemas é capaz de prover a digitalização da *full-waveform* (PERSSON et al., 2005).

5 MATERIAIS

5.1 SENSORES AEROTRANSPORTADOS

Na presente pesquisa foram utilizados dados provenientes de dois sensores aerotransportados. Um SLISA modelo ALTM 2050, desenvolvido pela empresa canadense Optech Incorp., e uma câmara digital Kodak DCS Pro SLR/c com objetiva de 35mm da Canon. As especificações dos sensores seguem nas Tabelas 2 e 3.

TABELA 2 - ESPECIFICAÇÕES ALTM 2050

Descrição do sistema	Características
Modelo do equipamento	ALTM 2050
Fabricante do equipamento	Optech
Ano de fabricação	2002
Frequência do pulso laser	50.000 pulsos por segundo – 50kHz
Frequência de varredura	Variável de 1Hz a 100Hz
Ângulo de varredura	Variável 0° a 40°
Sistema Inercial (IMU) / GPS	Applanix
Capacidade de armazenamento	36 GigaBytes
Software da operação de voo	ALTM-NAV (Optech)
Software do processamento	REALM (Optech)
Tipo de coleta de dados	Primeiro e último retorno do pulso

TABELA 3 - ESPECIFICAÇÕES DA CÂMARA DIGITAL

Descrição do sistema	Características
Fabricante	Kodak
Modelo	DCS Pro SLR/c
Dimensões	136,5 x 149,2 x 76,2 mm
Sensor	CMOS (36 x 24 mm – 4500 x 3000 pixel)
Resolução	13,5 MP
Tamanho do Pixel	0,008 mm
Objetiva	Canon EF 35 mm f/1.4L
Distância Focal	35 mm

5.2 ÁREAS DE ESTUDO

As áreas de estudo compreenderam regiões urbanizadas localizadas nos municípios de Telêmaco Borba e de Ponta Grossa, ambas no Estado do Paraná (FIGURA 8). Na área em Ponta Grossa foi implantado um campo de prova para a realização do procedimento de calibração aérea independente, e a área em Telêmaco Borba foi utilizada para o emprego do procedimento de calibração em serviço e também obtenção das ortoimagens.



FIGURA 8 - LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

FONTE: Adaptado pelo autor (GOOGLE EARTH, 2011)

5.3 LEVANTAMENTOS DE CAMPO

Visando atender os processos de calibração e posterior avaliação das ortoimagens, foram levantados nas áreas de estudo pontos de apoio pré-sinalizados e fotoidentificáveis. Em Telêmaco Borba, uma vez que o aerolevanteamento já havia sido realizado, foram definidos elementos fotoidentificáveis por meio das imagens aéreas para a posterior determinação das suas coordenadas em campo. Tendo em vista ainda que os pontos nesta área seriam utilizados também na avaliação planimétrica das ortoimagens convencionais obtidas a partir de um MDT (Modelo Digital de Terreno), restringiu-se a seleção apenas de pontos localizados no solo, como por exemplo, faixas de segurança no asfalto.

Na área de estudo em Ponta Grossa, previamente à realização do aerolevanteamento, foram materializados pontos pré-sinalizados e determinadas suas respectivas coordenadas, porém, após o voo, observou-se que apenas uma pequena parcela destes estava visível nas imagens tomadas a 2.000 metros de

altura de voo. A etapa de aerolevanteamento em Ponta Grossa previu a tomada de imagens a 1.000 e a 2.000 metros de altura de voo, e devido a este fato foram selecionados elementos fotoindicáveis nas imagens aéreas de menor escala e determinadas suas respectivas coordenadas em campo.

5.3.1. Campo para calibração aérea independente

Os alvos pré-sinalizados do campo de calibração aérea independente em Ponta Grossa foram materializados através de circunferências de raio igual a 30cm pintadas na cor branca em contraste com o asfalto escuro (FIGURA 9).

Para os pontos fotoindicáveis (FIGURA 10), uma vez que os mesmos foram planejados com base nas imagens provenientes do aerolevanteamento, tomou-se como critério, além da definição do ponto na imagem, a distribuição espacial dos mesmos visando um maior número de leituras, ou seja, pontos homólogos que fossem visíveis em um maior número de imagens possível.

FIGURA 9 - PONTOS PRÉ-SINALIZADOS.



FONTE: O autor (2011)

FIGURA 10 - PONTOS FOTOIDENTIFICÁVEIS.



FONTE: O autor (2011)

Ao todo foram levantados 98 pontos de apoio, 62 pré-sinalizados e 36 fotoindicáveis. Suas respectivas coordenadas geodésicas foram determinadas com a aplicação do método de posicionamento GNSS relativo estático, utilizando receptores GNSS geodésicos de dupla frequência e a partir de vértices da Rede

Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). No Apêndice 1 seguem as coordenadas dos pontos de apoio levantados na área de estudo de Ponta Grossa, e na Figura 11, representados pela cor amarela e com o prefixo “P”, seguem os pontos pré-sinalizados, e representados pela cor branca e com o prefixo “F”, seguem os pontos fotoidentificáveis.

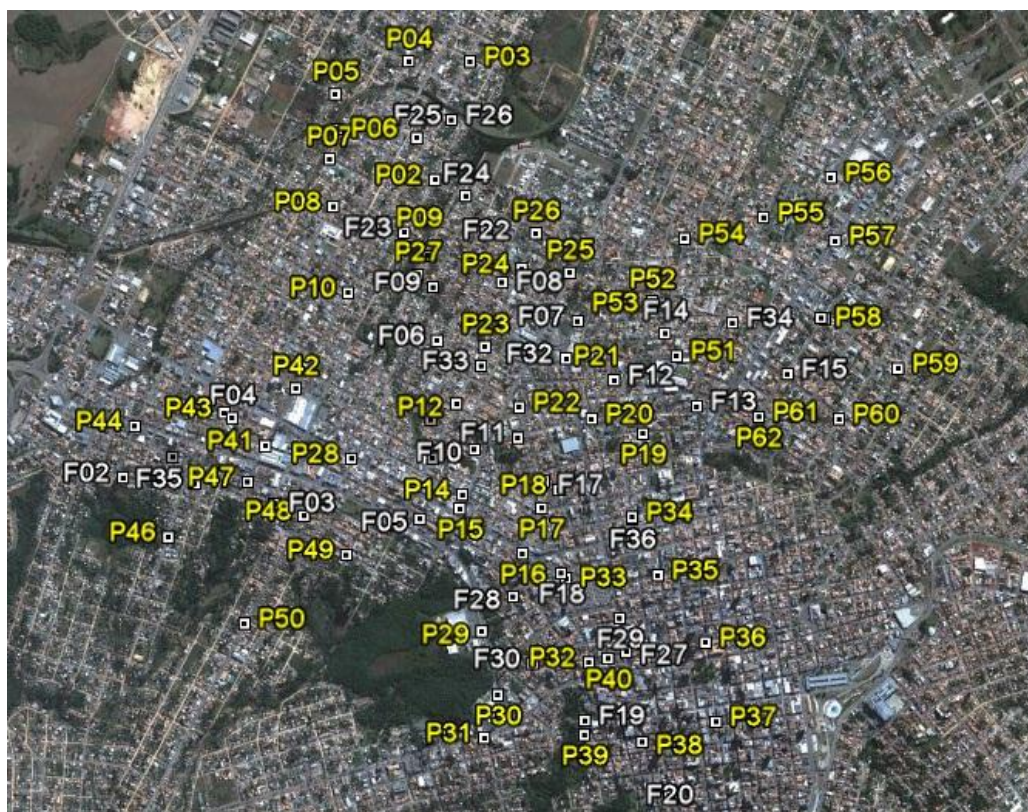


FIGURA 11 - PONTOS DE APOIO LEVANTADOS NA ÁREA DE ESTUDO DE PONTA GROSSA

FONTE: Adaptado pelo autor (GOOGLE EARTH, 2011)

Os levantamentos em campo na área de estudo em Ponta Grossa foram realizados nos dias 09/04/2011, 10/04/2011, 11/04/2011, 25/07/2011 e 26/07/2011. A média das precisões obtidas dos posicionamentos, compatível com o método empregado, foi de 2cm na planimetria e de 4cm na altimetria.

5.3.2. Área de estudo para calibração em serviço e avaliação das ortoimagens

Para a definição da área para a calibração em serviço e, geração e avaliação das ortoimagens utilizando POI provenientes dos dois procedimentos de calibração, foram utilizados dados provenientes de um aerolevanteamento realizado em 2010. Neste recobrimento aéreo foram empregados os mesmos sensores objetos de estudo, e foi imageada toda a área urbanizada do município de Telêmaco Borba.

A partir desses dados foi selecionada uma pequena área urbanizada (aproximadamente 2km²), contemplando a localização da base GNSS que apoiou o aerolevanteamento (laser e imagens aéreas) em Telêmaco Borba. Nesta área, definida como área de estudo para calibração em serviço e avaliação das ortoimagens, foram pré-selecionados pontos fotoidentificáveis nas imagens para o posterior levantamento de campo.

O levantamento em campo foi realizado no dia 12/03/2011 e a média das precisões obtidas dos posicionamentos, compatível com o método empregado, foi de 2cm na planimetria e de 4cm na altimetria. As coordenadas foram determinadas com a aplicação da mesma metodologia e equipamentos utilizados no campo para calibração aérea em Ponta Grossa, porém partindo do mesmo vértice que apoiou o aerolevanteamento em 2010.

Ao todo foram levantados 64 pontos fotoidentificáveis e suas respectivas coordenadas seguem descritas no Apêndice 2. A Figura 12 ilustra a distribuição dos pontos na área de estudo.

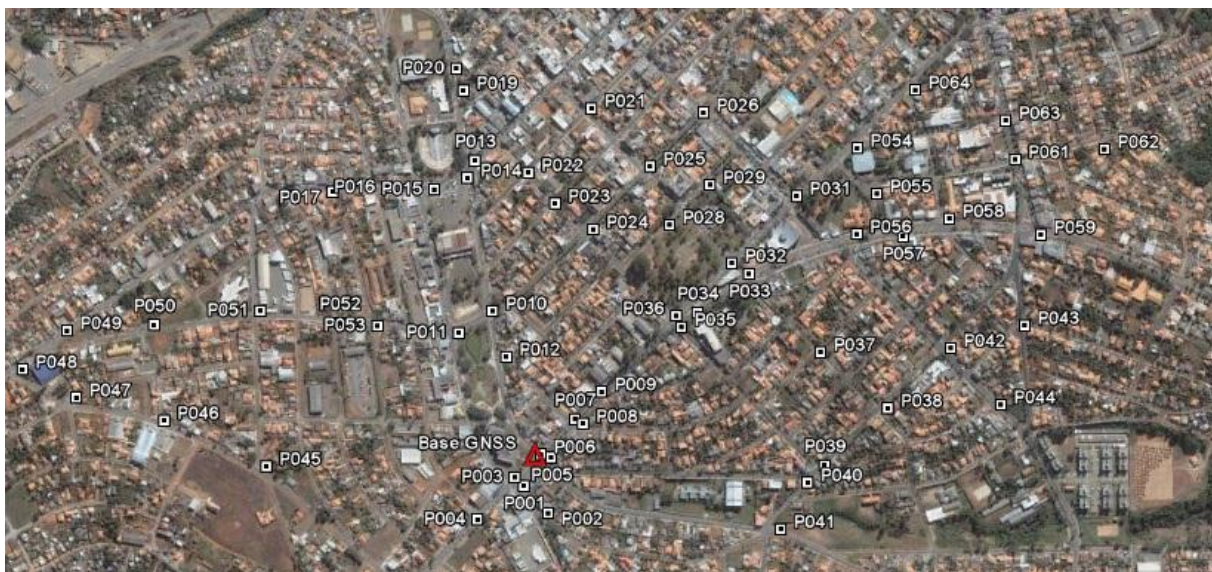


FIGURA 12 - PONTOS DE APOIO LEVANTADOS NA ÁREA DE ESTUDO DE TELÊMACO BORBA
 FONTE: Adaptado pelo autor (GOOGLE EARTH, 2011)

5.4 AEROLEVANTAMENTOS

5.4.1. Planejamento e aquisição dos dados para a calibração aérea independente

A aquisição dos dados provenientes dos dois sensores, laser e câmara digital, foi simultânea, dessa forma o planejamento dos parâmetros dos recobrimentos aéreos visou atender os requisitos de ambos.

Os parâmetros predefinidos para a realização do aerolevante na área em Ponta Grossa seguem na Tabela 4.

TABELA 4 - PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO DO VOO DE CALIBRAÇÃO AÉREA INDEPENDENTE

Parâmetros	Valores
Ângulo de varredura (Laser)	40°
Frequência de varredura (Laser)	32,8 Hz e 25 Hz *
Frequência de operação (Laser)	50 kHz
Superposição lateral (Laser)	55%
Intervalômetro (Câmara)	6 s e 10 s *
Superposição Lateral (Câmara)	~ 50%
Superposição Longitudinal (Câmara)	~ 60%
Velocidade do obturador	1 / 800
Altura de voo	1.000 m e 2.000 m
Velocidade da aeronave	66,87 m/s

*Intervalo utilizado em função da altura de voo.

Para o recobrimento aéreo no campo de calibração aérea independente, foi prevista a realização de quatro faixas com altura de voo igual a 1.000 metros, sendo duas paralelas entre si com 50% de superposição lateral e outras duas paralelas também com o mesmo percentual de superposição lateral, porém com orientação perpendicular as anteriores. Outras duas faixas perpendiculares entre si, com a altura de voo igual a 2.000 metros, foram realizadas e estas recobrimo a mesma região imageada a 1.000 metros de altura sobre o solo. Tal configuração de voo foi definida com base nas recomendações de Soininen (2008) para a calibração de câmaras integradas em sistemas de perfilamento a laser aéreo. Para melhor entendimento do esquema do voo segue a orientação das faixas representadas na Figura 13.

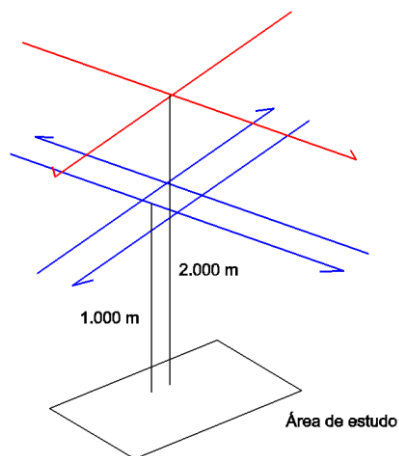


FIGURA 13 - ORIENTAÇÃO DAS FAIXAS DE VOO EM PONTA GROSSA

FONTE: O autor (2011)

O aerolevantamento ocorreu no dia 30/05/2011 com a aquisição de 56 imagens aéreas. A projeção das imagens no espaço objeto e a orientação das faixas realizadas podem ser observadas na Figura 14.

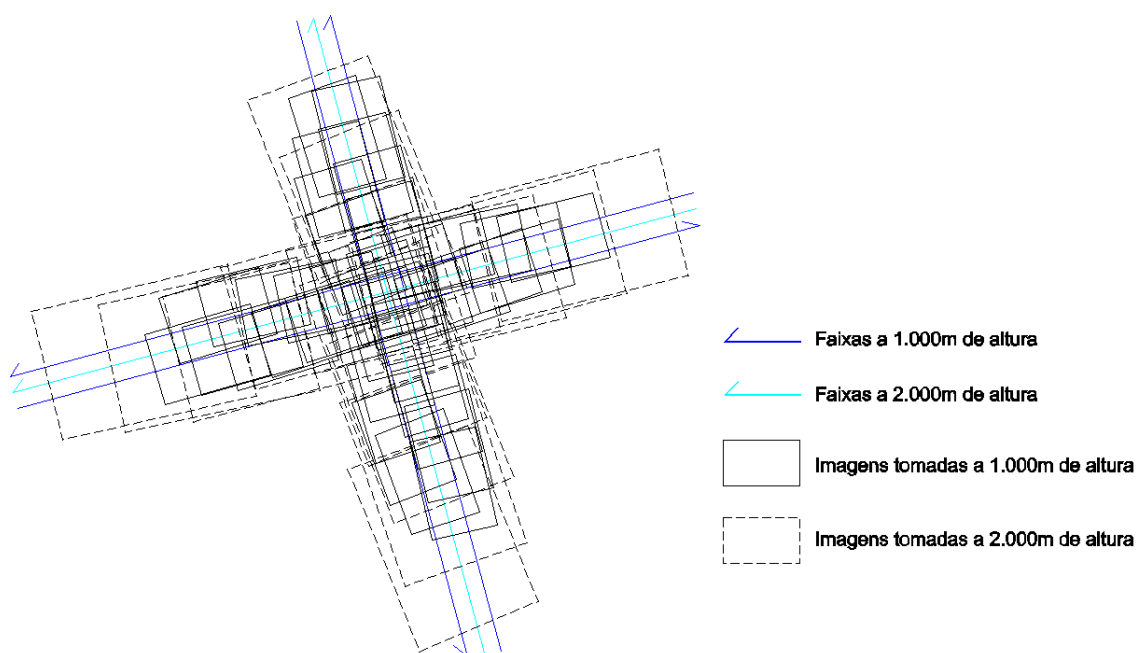


FIGURA 14 - AEROLEVANTAMENTO NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO INDEPENDENTE

FONTE: O autor (2011)

5.4.2. Aquisição dos dados para a calibração em serviço e obtenção das ortoimagens

Os dados utilizados para o procedimento de calibração em serviço e avaliação das ortoimagens são provenientes de um recobrimento aéreo no município de Telêmaco Borba, conforme já mencionado. Diferentemente do procedimento realizado em Ponta Grossa, neste aerolevantamento foi empregado uma configuração convencional de voo (TABELA 5) visando a obtenção de produtos cartográficos atendendo a escala 1:2.000.

TABELA 5 - PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO DO VOO DE CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO

Parâmetros	Valores
Ângulo de varredura (Laser)	40°
Frequência de varredura (Laser)	32,8 Hz
Frequência de operação (Laser)	50 kHz
Superposição lateral (Laser)	30%
Intervalômetro (Câmara)	6 s
Superposição Lateral (Câmara)	~ 25%
Superposição Longitudinal (Câmara)	~ 60%
Velocidade do obturador	1 / 800
Altura de voo	1.000 m
Velocidade da aeronave	66,87 m/s

O aerolevantamento em Telêmaco Borba contemplou toda a área urbanizada do município, porém, para a realização desta pesquisa uma pequena parcela da área total imageada foi utilizada. Os aerolevantamentos no município de Telêmaco Borba foram realizados nos dias 30/06/2010, 01/07/2010 e 02/07/2010, e as imagens que compreenderam a área de estudo foram adquiridas apenas nos dois primeiros voos conforme pode ser observado na Figura 15. Na Figura 16 seguem representadas as direções das faixas de voo correspondentes ao mapeamento na área de estudo.

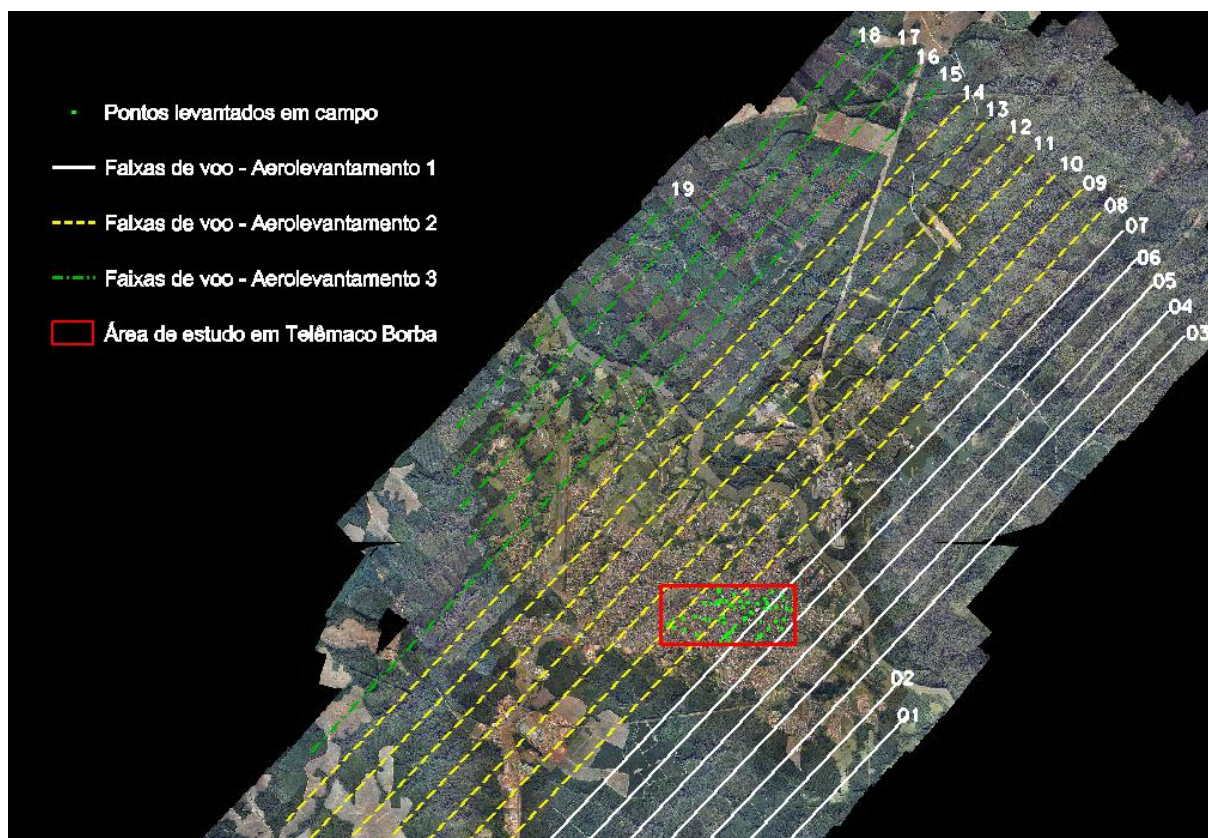


FIGURA 15 - AEROLEVANTAMENTO EM TELÊMACO BORBA

FONTE: O autor (2012)



FIGURA 16 - DIREÇÃO DAS FAIXAS DE VOO NA ÁREA DE ESTUDO EM TELÊMACO BORBA

FONTE: O autor (2012)

5.5 DADOS PROVENIENTES DO SLSA

O fluxograma de aquisição e processamento dos dados provenientes do SLSA segue ilustrado na Figura 17.

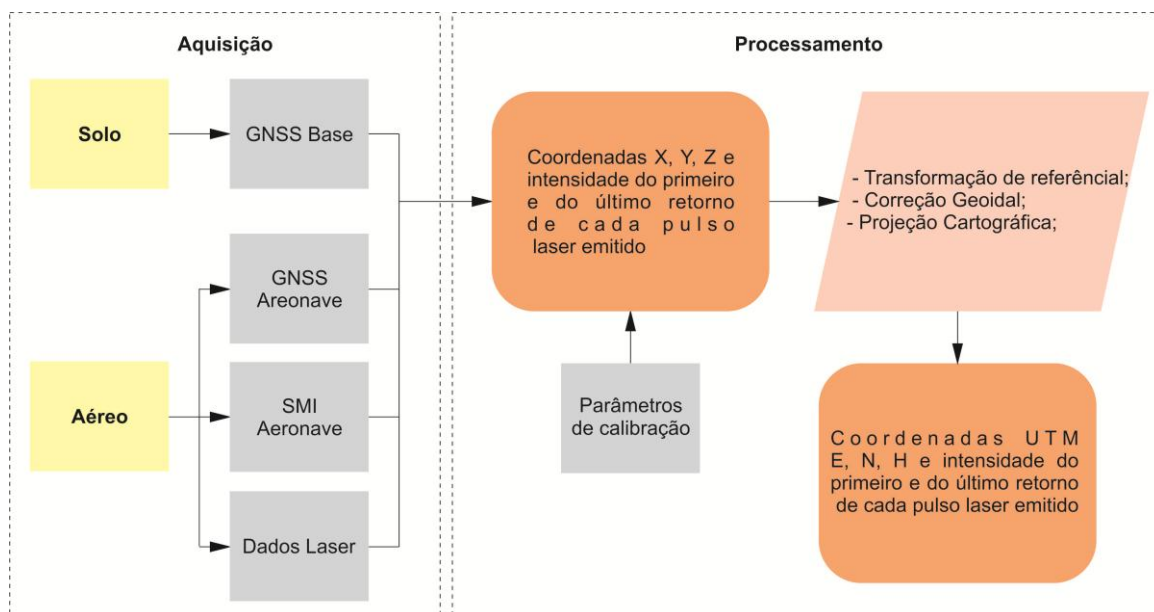


FIGURA 17 - FLUXOGRAMA DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS DO SLSA

FONTE: Adaptado pelo autor (ZANDONÁ, 2006)

Para atendimento dos procedimentos de calibração e obtenção das ortoimagens, nesta pesquisa foram utilizados indiretamente os dados dos sistemas GNSS/SMI e a nuvem de pontos classificada como pontos de terreno (MDT), ambos provenientes do SLSA. Diversos trabalhos descrevem a aquisição, processamento e classificação dos dados do SLSA (KERSTING, 2006, ZANDONÁ, 2006, MARTINS, 2010) não sendo o enfoque da presente pesquisa detalhar estas metodologias.

6 METODOLOGIA

Este capítulo contempla a metodologia empregada na integração entre o SLSA e a câmara digital, os procedimentos de calibração aérea e a obtenção e avaliação das ortoimagens da área de estudo em Telêmaco Borba.

Para um melhor entendimento dos itens contemplados nesta pesquisa, segue um fluxograma ilustrado na Figura 18.

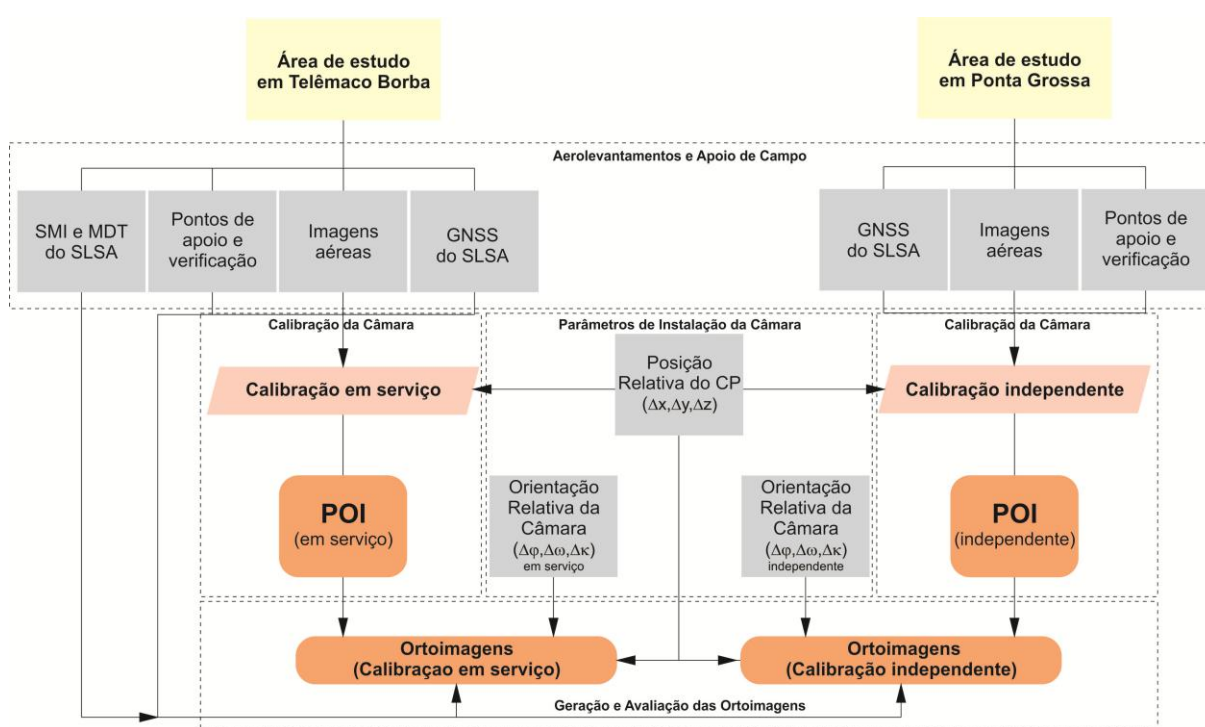


FIGURA 18 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DA PESQUISA

FONTE: O Autor

6.1 INTEGRAÇÃO DA CÂMARA AO SLSA

O SLSA possui um receptor GNSS geodésico de dupla frequência e um SMI, dessa forma, ao acoplarmos uma câmara digital de baixo custo na mesma plataforma aérea do SLSA, podemos utilizar indiretamente tais equipamentos na obtenção dos POE das estações de exposição da câmara durante o aerolevanteamento. A utilização indireta se deve ao fato da trajetória, a qual é

definida pelas posições e orientações da aeronave, estar referida ao centro do espelho de varredura do SLSA, sendo necessária a determinação dos parâmetros de instalação da câmara relativos a este referencial.

Martins (2010), também utilizando dados e equipamentos do instituto LACTEC, realizou a integração de uma câmara digital de baixo custo (KODAK DCS Pro 14n) no mesmo SLSA (ALTM 2050) utilizado na presente pesquisa. Porém, recentemente, o LACTEC adquiriu uma nova câmara (KODAK DCS Pro SLR/c) sendo necessária uma nova integração, a qual foi um dos objetivos específicos realizados nesta pesquisa. As etapas realizadas para a integração da câmara digital no SLSA foram:

1. A construção de uma plataforma para instalação da câmara digital de baixo custo de maneira a fixar a mesma na plataforma aérea;
2. A conexão entre a câmara e o SLSA de maneira a registrar nos dados do SLSA os instantes de aquisição de cada imagem durante o recobrimento aéreo; e
3. A determinação dos parâmetros de instalação (posições relativas e ângulos relativos entre os sensores e os referenciais dos sistemas GNSS/SMI).

Os itens 1 e 2 supracitados foram desenvolvidos com base no trabalho realizado por Martins (2010).

6.1.1. Adaptação da câmara na plataforma aérea

Para a instalação da câmara digital na plataforma aérea foi adaptada a caixa acrílica previamente construída por Martins (2010), porém aumentando suas dimensões internas e adicionando uma base emborrachada de maneira a absorver os impactos causados pela trepidação da aeronave durante a realização do voo.

O registro dos instantes de tomadas das imagens foi realizado entre a conexão de *flash* externo da câmara e uma conexão RS232 localizada no equipamento GNSS/SMI do SLSA. De acordo com as especificações da câmara, a

velocidade de disparo através da conexão de *flash* externo é igual a 1/180 do segundo, ou seja, 0,005 segundos.

Os sensores foram instalados no avião modelo SENECA III da empresa de aerolevantamentos Fiducial Engenharia e Aerolevantamentos LTDA (FIGURA 19). Os dois sensores, laser e câmera, após a instalação, ficaram localizados bem próximos um do outro (~25cm), como pode ser observado na Figura 20. A Figura 21 apresenta a caixa acrílica adaptada para instalação da câmera.



FIGURA 19 - SENSORES INSTALADOS NA AERONAVE

FONTE: O autor (2011)



FIGURA 20 - VISTA DOS SENSORES POR BAIXO DA AERONAVE

FONTE: O autor (2011)

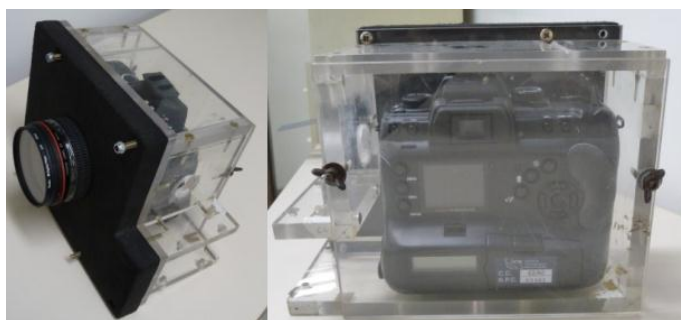


FIGURA 21 - CAIXA ACRÍLICA ADAPTADA PARA INSTALAÇÃO DA CÂMARA

FONTE: O autor (2011)

6.1.2.Determinação dos parâmetros de instalação

De acordo com Kersting (2011), diferentemente do georreferenciamento indireto, onde somente a calibração da câmara está envolvida no sistema de calibração fotogramétrico, a orientação direta do sensor também envolve os parâmetros de instalação. Na presente pesquisa, a fim de obter os parâmetros de instalação da câmara, foi necessário primeiramente determinar os parâmetros de instalação do SLSA, devido à determinação das estações de exposição da câmara ser obtida indiretamente utilizando os equipamentos GNSS/SMI do sistema de perfilamento a laser.

Os parâmetros de instalação do SLSA também foram empregados no processamento da trajetória da aeronave, a qual foi posteriormente utilizada na extração da nuvem de pontos proveniente do perfilamento aéreo a laser. Tais parâmetros consistem na orientação e posição relativa entre o espelho de varredura do SLSA e o SMI, e também a posição relativa entre o centro do espelho de varredura e a antena GNSS. Os parâmetros de posição e orientação relativa do SMI são fornecidos pelo fabricante do equipamento, já a posição relativa da antena GNSS é obtida, geralmente, a partir de um levantamento topográfico devido a esta se alterar para cada instalação do sistema em uma nova plataforma aérea.

No levantamento topográfico não é possível realizar medições diretamente no centro do espelho de varredura e no centro de fase L1 da antena GNSS, por isso os fabricantes dos SLSA geralmente referenciam tais posições a algum ponto externo nos equipamentos. Os parâmetros fornecidos pelo fabricante do SLSA ALTM 2050 são:

- A posição relativa entre a origem do SMI e o centro do espelho de varredura do sensor laser;
- A orientação relativa entre o SMI e o espelho de varredura do sensor laser;
- A posição relativa entre o centro do espelho de varredura e um ponto localizado na parte externa do sensor (FIGURA 22); e
- A posição do centro de fase L1 na antena GNSS.

Para a determinação dos parâmetros de instalação da câmara, com base nas informações supra listadas, obteve-se a posição relativa entre o CP da câmara e o centro do espelho de varredura do sensor laser com o emprego de um método topográfico, e também as posições relativas utilizadas nos processamento dos dados do SLSA (item 6.1.2.1). Os parâmetros que definem a orientação relativa entre a câmara e o sensor laser foram utilizados apenas na etapa de geração das ortoimagens, e o procedimento empregado para a obtenção destes segue no item 6.3.1.

6.1.2.1. Posições Relativas

O fabricante do SLSA utilizado nesta pesquisa recomenda um procedimento, a partir de um levantamento topográfico, para a determinação do posicionamento relativo entre o centro de fase L1 da antena GNSS e o centro do espelho de varredura do SLSA. A metodologia é descrita em Optech Inc. (2000), porém não contempla a determinação do posicionamento relativo do CP da câmara, e ainda exige algumas etapas a serem realizadas durante o levantamento topográfico que dificultam a sua execução, como por exemplo, o nivelamento da plataforma aérea e a orientação do equipamento topográfico (estação total ou teodolito) conforme a direção de voo da aeronave.

Visando um procedimento, para a realização da etapa de levantamento topográfico, com maior simplicidade de execução e que contemplasse a determinação do posicionamento relativo do CP da câmara, nesta pesquisa foi adaptada a metodologia proposta pelo fabricante do equipamento.

Para obtenção dos parâmetros de posicionamento relativo foram realizadas duas etapas principais, foram elas:

1. Determinação das posições relativas num referencial local através de um levantamento topográfico; e
2. Transformação das posições no referencial local para o referencial no centro do espelho de varredura do SLSA através do emprego de uma transformação matemática.

a) Posições relativas obtidas no referencial local

Para a determinação do posicionamento relativo entre o centro de fase L1 da antena GNSS, a origem do SMI, o centro do espelho de varredura do sensor laser e o CP da câmara, com o emprego do levantamento topográfico, foram utilizados uma Estação Total, com precisão angular (σ_α) igual a 5", e linear (σ_D) igual a 0,8 mm, e um mini prisma. Tais posicionamentos não podem ser determinados diretamente uma vez que os mesmos encontram-se internamente nos equipamentos, sendo necessárias medições indiretas que permitam recuperar tais coordenadas.

Para a realização desta etapa foi aplicado o método de levantamento topográfico por irradiação com a repetibilidade de leituras nas posições direta (PD) e inversa (PI) da luneta, e para cada ponto predefinido foram realizadas ao menos três leituras. A seguir segue a relação dos pontos predefinidos para obtenção das coordenadas pelo método topográfico no referencial local:

- Sensor Laser: um ponto na alça (S1), 4 pontos nas extremidades (S4, S5, S6, S7) e 2 pontos nos parafusos superiores (S2, S3) (FIGURA 22). As medições nestes pontos visaram à recuperação da posição e orientação do sensor;
- Antena GNSS: um no centro geométrico superior da antena (A1) e 4 pontos nos parafusos superiores (A2, A3, A4, A5) (FIGURA 23). As medições nestes pontos visaram à determinação do centro de fase L1 com base nas especificações da antena; e
- Câmara: um no centro da borda da lente (C1) e 4 pontos na parte superior da câmara (C2, C3, C4, C5) (FIGURA 24). As medições nestes pontos visaram à determinação da posição do CP.

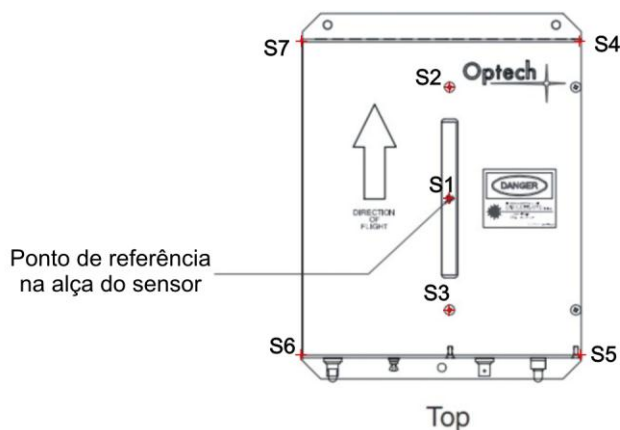


FIGURA 22 - MEDIÇÕES NO SENSOR DO SLSA

FONTE: O autor (2011)

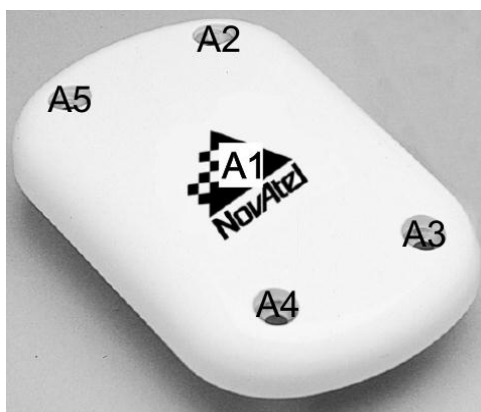


FIGURA 23 - MEDIÇÕES NA ANTENA GNSS

FONTE: O autor (2011)



FIGURA 24 - MEDIÇÕES NA CÂMARA

FONTE: O autor (2011)

Para a determinação da posição do CP, foi definido um vetor passando pelo ponto “C1”, na borda da lente e ortogonal ao plano definido pelos pontos “C2”, “C3”, “C4” e “C5” na parte superior do corpo da câmera (FIGURAS 24 e 25). A localização física do CP na câmera é desconhecida, dessa forma foi preestabelecida esta como sendo a interseção da metade do comprimento da objetiva da câmera com o vetor definido previamente.



FIGURA 25 - LOCALIZAÇÃO DO CP

FONTE: O autor (2011)

A determinação da orientação da câmara instalada na plataforma aérea utilizando o método topográfico teve como finalidade apenas a obtenção do posicionamento relativo com maior exatidão do CP.

A origem do referencial local foi definida pela posição que estava instalada a estação total para a realização das medições, sem uma orientação pré-definida. A Figura 26 ilustra a esquematização empregada para realização das medições e obtenção das coordenadas no referencial local.



FIGURA 26 - MEDIÇÕES COM A ESTAÇÃO TOTAL

FONTE: O autor (2012)

A estação total foi posicionada de maneira que pudessem ser realizadas todas as medições a partir de uma única posição. As medições na câmara foram realizadas tanto na parte interna da aeronave, quanto na parte externa através da leitura invertida do mini prisma.

b) Transformação do referencial local para o SLSA

As coordenadas referidas ao referencial local foram transformadas para o referencial do SLSA. Tal referencial tem como origem o centro do espelho de varredura do sistema de perfilamento a laser, e a orientação é definida pelo eixo “x” igual a direção de voo, o eixo “z” positivo em direção ao solo, e o eixo “y” tornando o sistema dextrógiro. Para a transformação entre os referenciais foram aplicados parâmetros de translação ($\Delta x', \Delta y', \Delta z'$) e de rotação ($R_{x', y', z'}$), os quais foram

determinados através de um ajustamento paramétrico não linear com o modelo matemático funcional da transformação matemática do corpo rígido no espaço (9).

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R_{x',y',z'} \begin{bmatrix} x_0' \\ y_0' \\ z_0' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x' \\ \Delta y' \\ \Delta z' \end{bmatrix} \quad (9)$$

Onde:

$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}$: coordenadas no referencial local;

$R_{x',y',z'}$: matriz das rotações;

$\begin{bmatrix} x_0' \\ y_0' \\ z_0' \end{bmatrix}$: posições relativas ao centro do espelho de varredura;

$\begin{bmatrix} \Delta x' \\ \Delta y' \\ \Delta z' \end{bmatrix}$: parâmetros de translação;

Para entendimento do processo de ajustamento, foram consideradas como observações as medições realizadas no sensor do SLSA obtidas pelo método topográfico. Os valores adicionados na matriz dos coeficientes, relativos a tais observações, foram adquiridos com base nas especificações dadas pelo fabricante do SLSA com referência ao centro do espelho de varredura. Após a determinação das incógnitas pelo processo de ajustamento, os posicionamentos relativos da câmara e da antena GNSS ao centro do espelho de varredura, foram determinados através da aplicação da inversa da transformação matemática anteriormente apresentada. Maiores informações a cerca do método de ajustamento paramétrico não linear podem ser obtidas em Dalmolin (2004) e Gemael (1994).

6.1.3. Obtenção das posições das estações de exposição da câmara

As posições das estações de exposição da câmara foram utilizadas nas etapas de calibração. A obtenção destas se dá através da utilização da trajetória da aeronave, dos parâmetros de posicionamento relativo entre a câmara e o centro do espelho de varredura, e o arquivo de eventos, referente ao instante de tomada de cada imagem aérea registrada no SLISA.

O arquivo de eventos contém para cada imagem aérea proveniente do aerolevantamento, um número identificador e o tempo GNSS. A partir do tempo GNSS, o qual é definido pela semana GNSS e os segundos contados a partir do início desta, são obtidos os parâmetros de posição e orientação do SLISA provenientes da trajetória da aeronave, para o instante da tomada de cada imagem aérea. A taxa de atualização dos dados da trajetória é alta (200Hz), fato que permite a obtenção de tais parâmetros precisamente, a partir da interpolação dos instante anterior e posterior da aquisição de cada imagem.

Os parâmetros de posição e orientação obtidos da trajetória da aeronave para cada instante de tomada das imagens, juntamente com a posição relativa do CP da câmara ao centro do espelho de varredura do SLISA, foram utilizados para a determinação da posição das estações de exposição da câmara, conforme a equação apresentada a seguir (adaptado de SCHAER et al., 2007):

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}_{câmara} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}_{SLISA} + R_{\kappa\varphi\omega} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (10)$$

Onde:

$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}_{câmara}$: posição da estação de exposição da câmara;

$R_{\kappa\varphi\omega}$: matriz das rotações com dados angulares obtidos da trajetória da aeronave;

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}_{SLSA} : \text{posição do centro do espelho de varredura do sensor do SLSA} \\ \text{obtida da trajetória da aeronave;} \\ \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} : \text{posição relativa do CP da câmara ao centro do espelho de} \\ \text{varredura;}$$

6.2 CALIBRAÇÃO DA CÂMARA

Foram realizados dois procedimentos de calibração da câmara conforme descritos abaixo:

1. Calibração aérea independente, utilizando os dados do recobrimento aéreo realizado em Ponta Grossa; e
2. Calibração em serviço, utilizando os dados do recobrimento aéreo realizado em Telêmaco Borba.

Em ambos os procedimentos foram fixadas as posições das estações de exposição da câmara através das mesmas obtidas conforme descrito anteriormente (item 6.1.3). Tal fixação foi realizada através do uso de injunções de posição aplicadas as posições das estações de exposição da câmara durante o processo de fototriangulação com parâmetros adicionais. A mesma é necessária visando à quebra das correlações alguns parâmetros entre os POI (c, x_{pp}, y_{pp}) e os POE (Z_0, X_0, Y_0).

6.2.1. Leituras dos pontos nas imagens

A leitura das coordenadas dos pontos de apoio, de verificação e fotogramétricos nas imagens foram realizadas no software *Leica Photogrammetry*

Suite. As respectivas coordenadas obtidas no referencial coluna e linha foram transladadas e orientadas para o centro da imagem (FIGURA 27) e multiplicadas pelo tamanho do pixel em milímetros, conforme a formulação abaixo (11).

$$X_{mm} = \left(\left(\frac{4.500 - 1}{2} \right) - L \right) \cdot 0,008mm$$

$$Y_{mm} = \left(\left(\frac{3.000 - 1}{2} \right) - C \right) \cdot 0,008mm$$
(11)

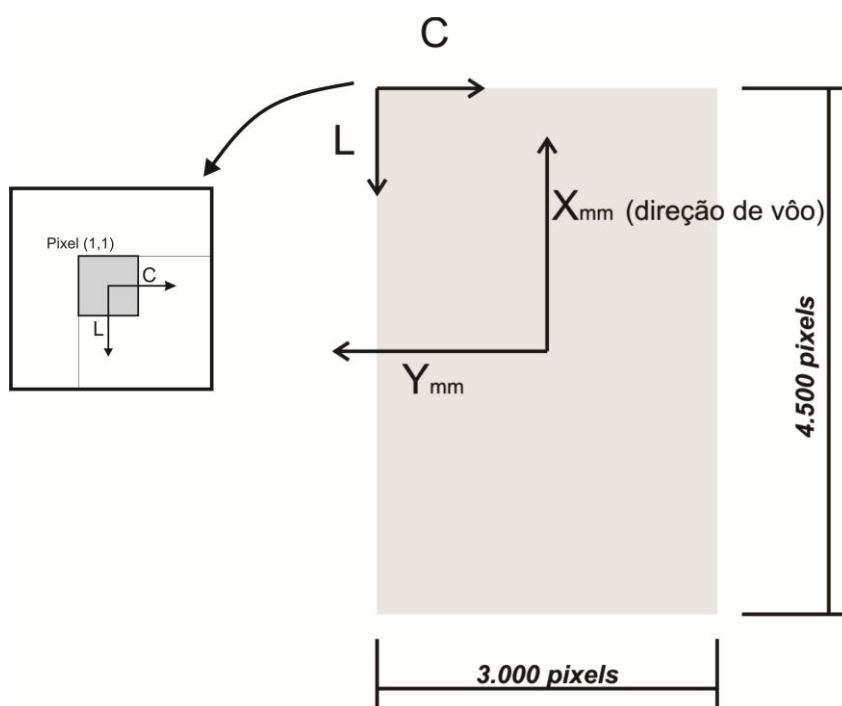


FIGURA 27 - TRANSLAÇÃO E ORIENTAÇÃO DO REFERENCIAL DAS IMAGENS

FONTE: O autor (2011)

6.2.2.Determinação dos POI

A geometria perspectiva foi estabelecida pela condição de colinearidade. No condicionamento teórico define-se que o ponto imagem, CP e ponto objeto são colineares, ou seja, o raio de luz refletido pelo ponto objeto propaga-se em linha reta até sensibilizar o ponto no plano imagem (MOFFITT, 1980).

O modelo matemático empregado para determinação dos POI da câmara consiste das equações de colinearidade expandidas com sete parâmetros: coordenadas do ponto principal (x_{pp}, y_{pp}), coeficientes da distorção radial simétrica (K_1, K_2, K_3), e coeficientes da distorção descentrada (P_1, P_2). As equações podem ser encontradas em Andrade (2003).

O conjunto de parâmetros ($c, x_{pp}, y_{pp}, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2$), definidos como POI, tem por finalidade a reconstrução do feixe perspectivo. Após o processo de calibração foram obtidos dois conjuntos de POI, um através do procedimento da calibração em serviço e outro pela calibração aérea independente.

6.2.3. Análise e avaliação das calibrações

Para a avaliação da precisão e qualidade das calibrações, observam-se as matrizes de variância-covariância dos parâmetros, o fator de variância a posteriori e as correlações entre pares de coeficientes. Também é avaliada se a REMQ (Raíz Quadrada do Erro Médio Quadrático) dos resíduos nas coordenadas dos pontos de apoio, posições das estações de exposição, e pontos fotogramétricos estão dentro dos limites pré-definidos no ajustamento.

Para a determinação da exatidão, alguns pontos levantados em campo nas áreas de estudo são inseridos no processo de fototriangulação como incógnitas. Dessa maneira as coordenadas obtidas são confrontadas com as mesmas determinadas em campo. Obtém-se as REMQ das discrepâncias dos pontos de verificação e comparam-se tais valores aos limites planimétrico e altimétrico pré-estabelecidos.

O valor limite planimétrico foi estabelecido como sendo igual ao tamanho médio de um pixel no terreno, e o valor altimétrico foi obtido da equação demonstrada a seguir (ALBERTZ; KREILING, 1989 *apud* GONÇALVES, 2006).

$$dz = \pm \frac{H^2}{B.f} d_{px} \quad (12)$$

Onde dz é igual ao valor da máxima discrepância altimétrica, H é igual a altura média de voo, B é igual ao valor médio da base fotogramétrica, f é igual a distância focal e d_{px} é igual ao valor da paralaxe.

6.3 OBTENÇÃO E AVALIAÇÃO DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS

Um mosaico de ortoimagens é constituído por duas ou mais ortoimagens, e, preferencialmente, na sua composição são utilizadas as regiões mais próximas ao centro de cada ortoimagem. Isso proporciona um menor efeito causado pelas distorções de lentes e pela perspectiva central das imagens aéreas.

Na obtenção dos mosaicos de ortoimagens pelo método de georreferenciamento direto foi utilizado o software *TerraPhoto* (*TerraSolid*). As informações mínimas necessárias para obtenção dos mosaicos são: os POI da câmara, a trajetória da aeronave, os instantes de tomadas das imagens aéreas, a nuvem dos pontos classificados como pontos de terreno provenientes do perfilamento aéreo a laser, a posição $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ relativa entre o CP da câmara e o referencial do SLSA, e a orientação relativa $(\Delta \kappa, \Delta \omega, \Delta \varphi)$ da câmara ao SLSA. Na Figura 28 seguem ilustradas as etapas para obtenção de um mosaico de ortoimagens.

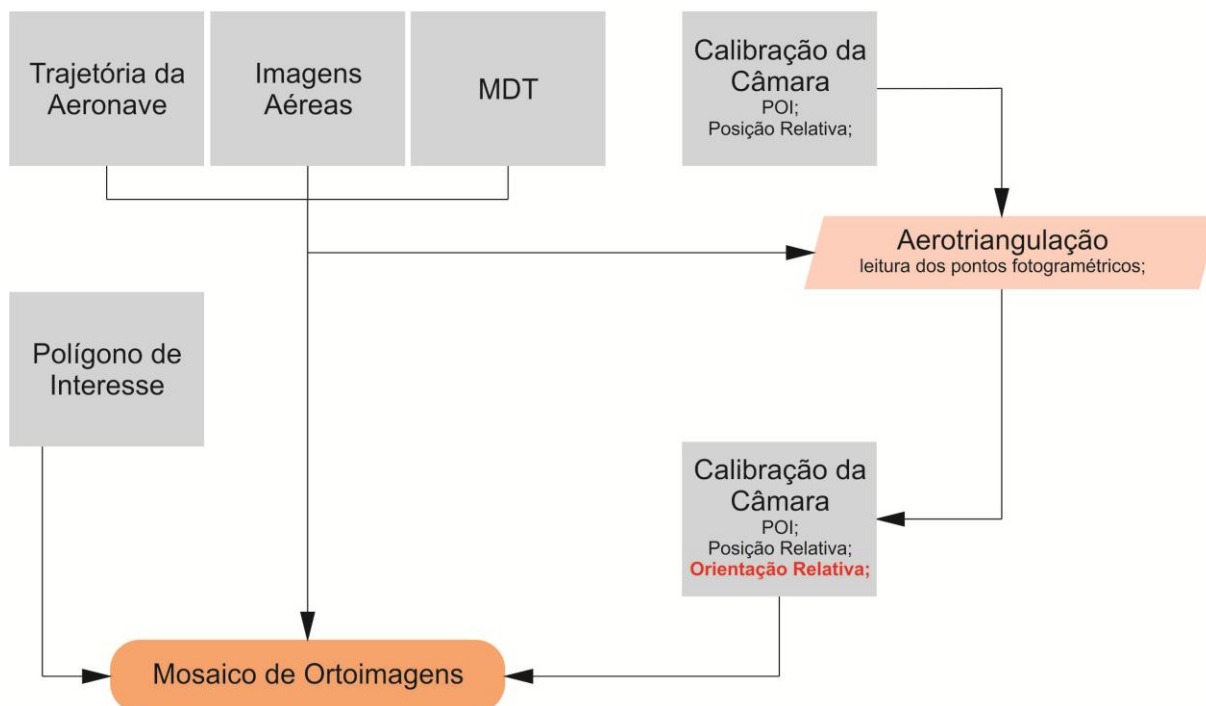


FIGURA 28 - FLUXOGRAMA PARA OBTENÇÃO DE UM MOSAICO DE ORTOIMAGENS

FONTE: O autor (2011)

6.3.1.Determinação dos parâmetros da orientação relativa ($\Delta\kappa, \Delta\omega, \Delta\varphi$)

A orientação relativa ($\Delta\kappa, \Delta\omega, \Delta\varphi$) entre o sensor laser do SLSA e a câmara digital foi obtida a partir de um processo de aerotriangulação utilizando o software comercial *TerraPhoto*. A metodologia implementada no software permite que novos parâmetros $\Delta\kappa, \Delta\omega$ e $\Delta\varphi$ sejam determinados para cada recobrimento aéreo, ou também sejam determinados para cada estação de exposição visando minimizar os efeitos causados pela instabilidade da câmara durante o voo, ou devido à imprecisão angular do SMI.

Para realizar a aerotriangulação é prevista a leitura de pontos fotogramétricos, sem a necessidade da inclusão de pontos de apoio. O apoio nesse processo é obtido da nuvem de pontos classificada como pontos de terreno provenientes do mapeamento aéreo a laser. É recomendado que as leituras dos pontos fotogramétricos sejam bem distribuídas (FIGURA 29), próximas as posições dos pontos de Von Grüber, e tais pontos limitem-se a pontos localizados no terreno uma vez que o apoio utilizado é o MDT.

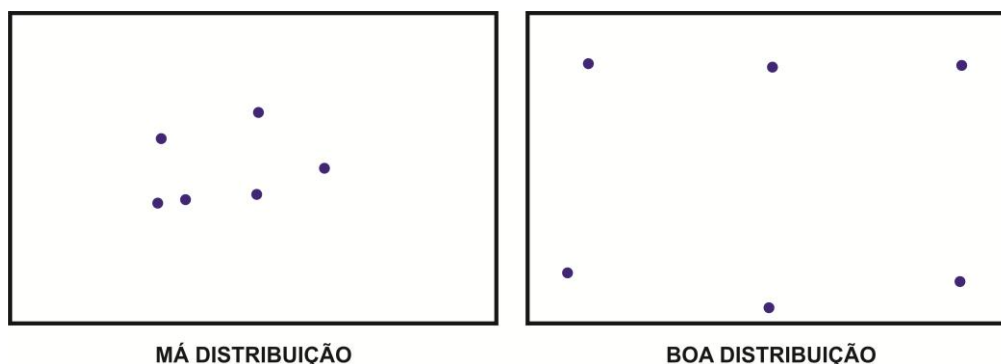


FIGURA 29 - LEITURA DOS PONTOS FOTOGRAMÉTRICOS NAS IMAGENS

FONTE: Adaptado pelo autor (SOININEN, 2008)

6.3.2. Avaliação dos mosaicos de ortoimagens

Visando analisar não apenas as influências dos POI na acurácia das ortoimagens, mas também a influência dos parâmetros de orientação relativa por voo ou por imagem foram obtidos quatro mosaicos de ortoimagens, sendo eles:

1. Mosaico de ortoimagens obtido utilizando os POI provenientes da calibração aérea independente e um conjunto de parâmetros de orientação relativa por voo de aerolevantamento;
2. Mosaico de ortoimagens obtido utilizando os POI provenientes da calibração aérea independente e um conjunto de parâmetros de orientação relativa para cada imagem aérea;
3. Mosaico de ortoimagens obtido utilizando os POI provenientes da calibração em serviço e um conjunto de parâmetros de orientação relativa por voo de aerolevantamento; e
4. Mosaico de ortoimagens obtido utilizando os POI provenientes da calibração em serviço e um conjunto de parâmetros de orientação relativa para cada imagem aérea.

Os mosaicos de ortoimagens foram analisados através das REMQ das discrepâncias dos pontos de verificação da área de estudo de Telêmaco Borba, e também foram avaliados segundo o PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica).

O PEC foi estabelecido pelo decreto nacional Nº 89.817 de 20 de junho de 1984, e fornece critérios de avaliação que garantam um nível de confiabilidade de produtos cartográficos produzidos do território nacional. Alguns critérios que podemos destacar são:

1. Noventa por cento dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica planimétrico estabelecido;
2. Padrão de Exatidão Cartográfica é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos; e
3. A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro-Padrão (EP) - $PEC = 1,6449 EP$.

Segundo Dalmolin e Leal (2001) o decreto 89.817 não se refere às escalas que deverão ser contempladas pela avaliação, porém estabelece o PEC, o erro padrão que permitem classificar cartas como A, B ou C, deixando implícito que, para todas as escalas este padrão poderá ser empregado. Os critérios de classificação seguem descritos:

- Classe A: 0,5 mm, na escala da carta, sendo de 0,3 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente;
- Classe B: 0,8 mm na escala da carta, sendo de 0,5 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente; e
- Classe C: 1,0 mm na escala da carta, sendo de 0,6 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.

A partir das especificações do PEC, baseado numa análise estatística, é possível avaliarmos um produto cartográfico quanto a sua acurácia e precisão. Dessa forma podemos obter quatro situações distintas, sendo elas:

1. Carta acurada e precisa;
2. Carta acurada e imprecisa;
3. Carta não acurada e precisa; e

4. Carta não acurada e imprecisa.

O cenário ideal é o número “1”, onde as feições representadas apresentam coerência entre si e também correspondem a realidade física do espaço objeto. Para a avaliação das ortoimagens obtidas nesta pesquisa este será o critério empregado. O PEC considera o termo “Erro-Padrão” equivalente a “Desvio Padrão”, sendo este último o termo adotado para demonstração dos resultados nesta pesquisa.

7 RESULTADOS

7.1 INTEGRAÇÃO DOS SENSORES

As coordenadas obtidas conforme a metodologia indicada no item 6.1.2.1 seguem na Tabela 6.

TABELA 6 - COORDENADAS OBTIDAS COM O LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

ID	Referencial Local			Referencial do SLSA		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	x (m)	y (m)	z (m)
Sensor 1	2,633	3,736	1,195	-0,051	-0,027	-0,500
Sensor 2	2,584	3,821	1,137	0,047	-0,027	-0,434
Sensor 3	2,682	3,653	1,132	-0,147	-0,027	-0,433
Sensor 4	2,661	3,913	1,136	0,088	0,086	-0,431
Sensor 5	2,800	3,676	1,130	-0,188	0,087	-0,431
Sensor 6	2,592	3,553	1,128	-0,188	-0,155	-0,431
Sensor 7	2,450	3,791	1,135	0,089	-0,157	-0,431
Câmara 1	2,432	3,654	0,587	-0,033	-0,245	0,114
Câmara 2	2,433	3,734	0,759	0,040	-0,203	-0,057
Câmara 3	2,519	3,579	0,755	-0,138	-0,207	-0,057
Câmara 4	2,420	3,520	0,756	-0,139	-0,323	-0,059
Câmara 5	2,376	3,699	0,761	0,038	-0,270	-0,060
Antena 1	2,573	3,395	1,724	-0,302	-0,248	-1,030
Antena 2	2,569	3,443	1,724	-0,259	-0,227	-1,029
Antena 3	2,610	3,369	1,713	-0,343	-0,228	-1,020
Antena 4	2,574	3,350	1,714	-0,342	-0,269	-1,021
Antena 5	2,533	3,423	1,724	-0,258	-0,268	-1,030
*Origem	0,000	0,000	0,000	-1,972	-4,192	0,634

* posição da estação total utilizada para determinação das coordenadas.

As posições relativas do CP da câmara e do centro de fase L1 da antena GNSS ao centro do espelho de varredura do SLISA foram obtidas indiretamente a partir das medições apresentadas na Tabela 6. Os valores obtidos seguem na Tabela 7.

TABELA 7 - POSIÇÕES RELATIVAS DO CP DA CÂMARA E A ANTENA GNSS AO CENTRO DO ESPELHO DE VARREDURA DO SLISA

CP da câmara			Centro de fase L1 da antena GNSS		
Δx_{CP}	Δy_{CP}	Δz_{CP}	Δx_{antena}	Δy_{antena}	Δz_{antena}
-0,035 m	-0,244 m	0,055 m	-0,302 m	-0,248 m	-1,026 m
$\pm 0,005$ m	$\pm 0,005$ m	$\pm 0,005$ m	$\pm 0,005$ m	$\pm 0,005$ m	$\pm 0,005$ m

7.2 CALIBRAÇÃO AÉREA INDEPENDENTE

Dos 98 pontos levantados na área de calibração foram utilizados 43 pontos de apoio e 41 pontos de verificação para avaliação do resultado da calibração, os demais pontos não foram utilizados devido a oclusões. Além dos pontos de apoio e verificação, também foram adicionados 94 pontos fotogramétricos no bloco aerofotogramétrico.

Na Figura 30 é apresentada a distribuição dos pontos de apoio, de verificação e fotogramétricos nas imagens, a orientação das faixas de voo e a projeção das imagens na área de estudo. Na Tabela 8 seguem as informações das faixas de voo realizadas.

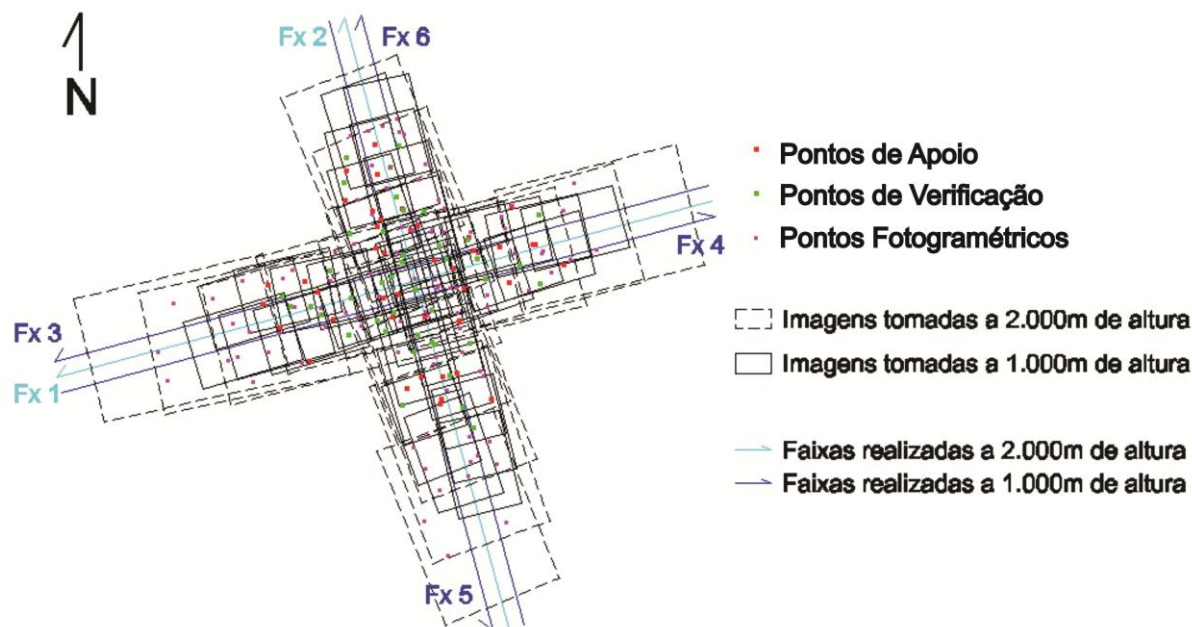


FIGURA 30 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS E DAS IMAGENS NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO EM PONTA GROSSA.

FONTE: O autor (2012)

TABELA 8 - DESCRITIVO DAS FAIXAS DE VOO REALIZADAS NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO EM PONTA GROSSA

Faixa	Azimute (°)	Altura de voo (m)	Número de fotos
1	255	2.000	08
2	345	2.000	07
3	255	1.000	10
4	75	1.000	10
5	165	1.000	10
6	345	1.000	11

Para a realização do processo de ajustamento foi atribuído o valor unitário para a variância *a priori*, o desvio padrão das fotocoordenadas igual a 0,004mm (equivalente a metade de um pixel), o desvio padrão das coordenadas dos pontos de apoio igual a 2cm, 2cm e 4cm respectivamente para X, Y e Z, e o desvio padrão das posições do CP da câmera ($\sigma X_0, \sigma Y_0, \sigma Z_0$) para os instantes de tomadas das imagens igual a 10cm. Tal precisão estabelecida para as posições do CP foi definida considerando as seguintes precisões: as posições da aeronave durante a realização do voo, o posicionamento relativo entre o centro do espelho de varredura do SLISA e

o CP da câmara, e o registro dos eventos respectivos aos instantes de tomada das imagens aéreas.

Durante a calibração observou-se a não significância dos parâmetros k_3 (distorção radial simétrica) e P_1 (distorção descentrada), sendo estes eliminados das etapas de ajustamento. Tal constatação se deu através da análise da matriz variância-covariância dos resíduos dos parâmetros, obtida num ajustamento prévio utilizando todos os parâmetros das distorções radial simétrica e descentrada (k_1, k_2, k_3, P_1, P_2). O parâmetro P_2 (distorção descentrada) apresentou maior influencia na correção de fotocoordenadas localizadas nas extremidades das imagens e foi optado pela utilização do mesmo.

Na Tabela 9 abaixo estão apresentados os POI obtidos com o procedimento de calibração aérea independente e seus respectivos desvios padrão.

TABELA 9 - POI OBTIDOS COM O PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO AÉREA INDEPENDENTE

Parâmetro	c (mm)	x_{pp} (mm)	y_{pp} (mm)	k_1 (mm ⁻²)	k_2 (mm ⁻⁴)	P_2 (mm ⁻¹)
Valor	34,250	-0,067	-0.207	$-9,1161 e^{-5}$	$1,0284 e^{-7}$	$2,7447 e^{-5}$
Precisão (σ)	0,002	0,002	0,004	$4,4770 e^{-7}$	$1,0053 e^{-9}$	$1,1425 e^{-6}$

C = distância focal, x_{pp}, y_{pp} = posição do ponto principal, k_1, k_2 = distorção radial simétrica, P_2 = distorção descentrada.

O software comercial utilizado posteriormente na geração das ortoimagens requer os valores dos POI no sistema de unidades em pixel. Dessa forma tais valores foram transformados e seguem apresentados na Tabela 10.

TABELA 10 - POI TRANSFORMADOS PARA O SISTEMA DE UNIDADES EM PIXEL (CALIBRAÇÃO INDEPENDENTE).

Parâmetro	c (pixel)	x_{pp} (pixel)	y_{pp} (pixel)	k_1 (pixel)	k_2 (pixel)	P_2 (pixel)
Valor	4281,300	-8,363	-25,825	$-5,8343 e^{-9}$	$4,2125 e^{-16}$	$2,1958 e^{-7}$

Na Figura 31 é apresentada a curva da distorção radial simétrica. É possível observarmos um afastamento superior a 400 micras em leituras de fotocordenadas nas extremidades das imagens.

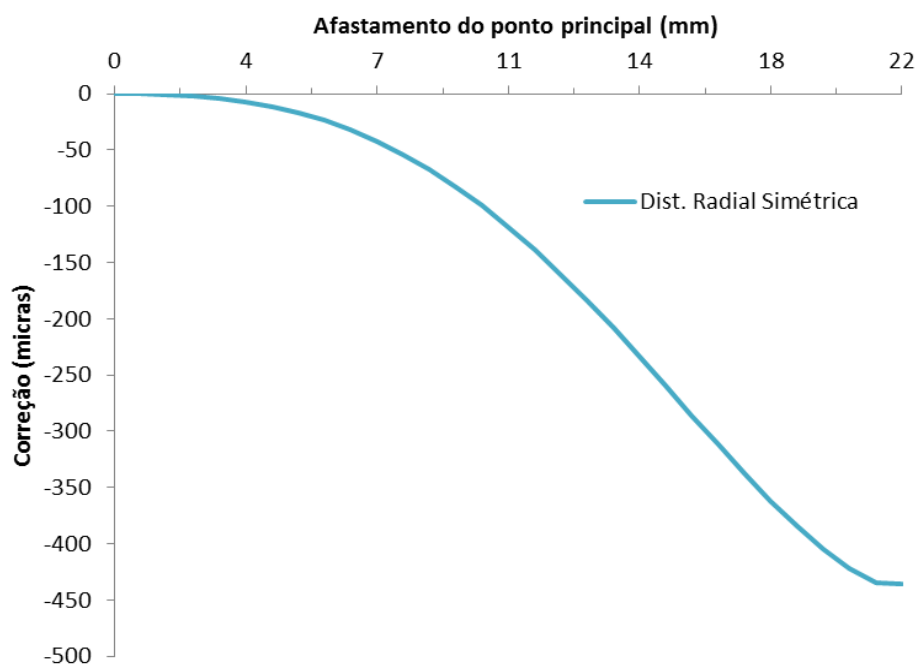


FIGURA 31 - CURVA DA DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA (CALIBRAÇÃO INDEPENDENTE)

FONTE: O autor (2012)

Na Figura 32 é apresentada a curva da distorção descentrada.

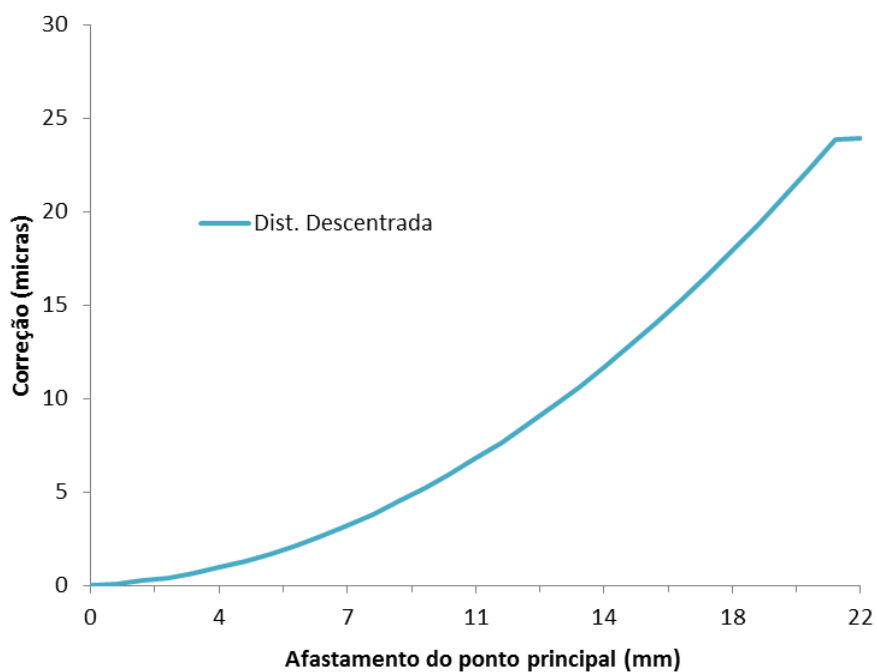


FIGURA 32 - CURVA DA DISTORÇÃO DESCENTRADA (CALIBRAÇÃO INDEPENDENTE)

FONTE: O autor (2012)

O teste estatístico do Qui-quadrado (χ^2) foi empregado dado um nível de significância de 95% e o resultado obtido segue na Tabela 11.

TABELA 11 - TESTE ESTATÍSTICO DO QUI-QUADRADO (χ^2) (CALIBRAÇÃO INDEPENDENTE)

Graus de liberdade	Intervalo de confiança ($\alpha = 95\%$)	Variância <i>a posteriori</i>	Resultado
1805	0.903 – 0.907	0.905	Aceito

Para análise da precisão foram obtidas as REMQ dos resíduos dos pontos de apoio, das posições das estações de exposição da câmara e das leituras das fotocoordenadas. Os resultados obtidos seguem apresentados na Tabela 12.

TABELA 12 - REMQ DOS RESÍDUOS (CALIBRAÇÃO AÉREA INDEPENDENTE)

REMQ - Pontos de apoio			REMQ - Estações de exposição			REMQ - Fotocoordenadas	
<i>E</i> (<i>m</i>)	<i>N</i> (<i>m</i>)	<i>H</i> (<i>m</i>)	<i>X</i> ₀ (<i>m</i>)	<i>Y</i> ₀ (<i>m</i>)	<i>Z</i> ₀ (<i>m</i>)	<i>x</i> (<i>mm</i>)	<i>y</i> (<i>mm</i>)
0,010	0,013	0,005	0,027	0,020	0,070	0,003	0,003

Para a análise da exatidão foram determinadas as médias e as REMQ das discrepâncias dos pontos de verificação implantados na área de estudo de Ponta Grossa. Os resultados seguem apresentados na Tabela 13 e demonstrados graficamente na Figura 33.

TABELA 13 - MÉDIA E REMQ DAS DISCREPÂNCIAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO (CALIBRAÇÃO AÉREA INDEPENDENTE)

Média			REMQ		
<i>E</i> (<i>m</i>)	<i>N</i> (<i>m</i>)	<i>H</i> (<i>m</i>)	<i>E</i> (<i>m</i>)	<i>N</i> (<i>m</i>)	<i>H</i> (<i>m</i>)
0,041	0,040	0,055	0,164	0,108	0,260

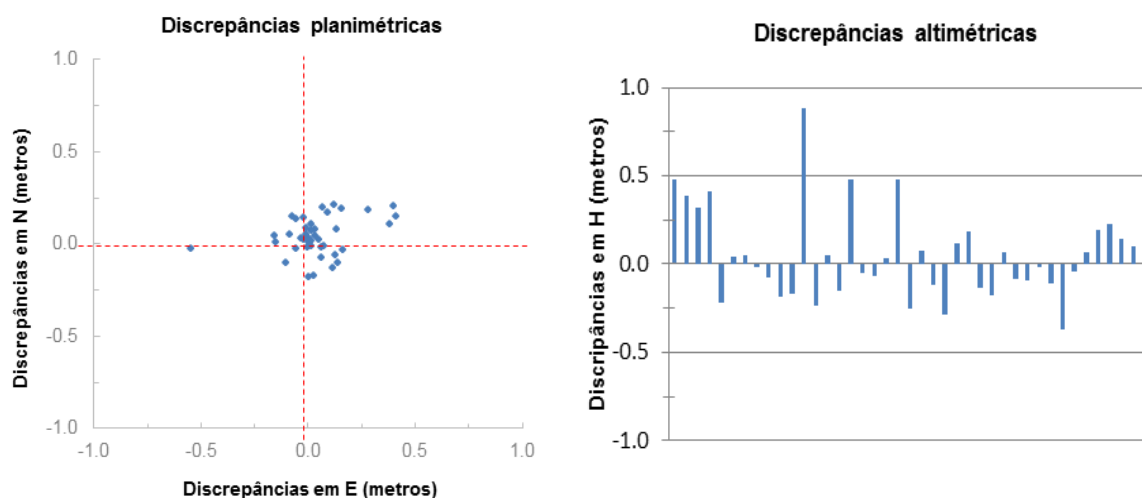


FIGURA 33 - GRÁFICOS DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO (CALIBRAÇÃO AÉREA INDEPENDENTE)

FONTE: O autor (2012)

O tamanho do pixel no terreno em média para as imagens tomadas a 1.000 metros de altura sobre o solo foi de 22cm, já para as imagens tomadas a 2.000 metros foi de 44cm. Dessa forma admitimos um valor igual a 33cm para a máxima discrepância planimétrica e, com base na equação (12), considerando os valores médios $H = 1.500\text{m}$, $B = 601,83\text{m}$, $f = 35\text{mm}$ e $d_{px} = 0,008\text{mm}$ (equivalente ao tamanho de um pixel), admitimos 85cm para a máxima discrepância altimétrica.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 13 observam-se que as discrepâncias ficaram bem inferiores às admitidas. Também analisando os gráficos apresentados na Figura 33 observa-se que os resultados não apresentaram tendência.

Na Tabela 14 é apresentada a matriz de correlação entre os POI obtidos.

TABELA 14 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DOS POI (CALIBRAÇÃO INDEPENDENTE)

	c	x_{pp}	y_{pp}	k_1	k_2	P_2
c	1,00					
x_{pp}	-0,02	1,00				
y_{pp}	0,01	0,02	1,00			
k_1	-0,84	-0,01	-0,04	1,00		
k_2	0,75	0,03	0,06	-0,97	1,00	
P_2	0,03	-0,01	0,75	-0,03	0,03	1,00

Onde 1,00 = máxima correlação e 0,00 = nenhuma correlação.

Observam-se correlações entre os parâmetros c (distância focal) e K_1, K_2 (distorção radial simétrica), entre y_{pp} (posição do ponto principal) e P_2 (distorção descentrada), e entre K_1 e K_2 . Tais correlações são desprezíveis uma vez que todos os POI obtidos serão aplicados conjuntamente, diferentemente das correlações observadas entre os POI e os POE. Na Tabela 15 é apresentada a média absoluta das matrizes de correlação entre os POI e os POE das imagens, obtidos na calibração.

TABELA 15 - MÉDIA ABSOLUTA DAS MATRIZES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMARA E OS POE DAS IMAGENS (CALIBRAÇÃO INDEPENDENTE)

	c	x_{pp}	y_{pp}	k_1	k_2	P_2
ω	0,02	0,24	0,58	0,03	0,03	0,46
φ	0,01	0,26	0,56	0,03	0,04	0,44
κ	0,01	0,01	0,07	0,01	0,01	0,06
X_0	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00
Y_0	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00
Z_0	0,04	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01

Onde 1,00 = máxima correlação e 0,00 = nenhuma correlação.

A correlação entre os parâmetros c, x_{pp}, y_{pp} e Z_0, X_0, Y_0 não existe devido à fixação das estações de exposição da câmara, porém, nota-se uma baixa correlação entre os POI (x_{pp}, y_{pp}, P_2) e os POE (ω, φ) que correspondem aos ângulos de movimento de asa (*roll*) e de bico (*pitch*) da aeronave durante o aerolevanteamento. Uma das hipóteses para a existência de tais correlações seria a falta de imagens oblíquas tomadas durante o aerolevanteamento de calibração. Os valores angulares de ω e φ para as estações de exposição da câmara são muito próximos a zero, o que é de se esperar num procedimento de aerolevanteamento convencional.

Apesar de estas correlações serem indesejadas, a metodologia utilizada nesta pesquisa prevê a determinação de parâmetros de orientação relativa posteriormente ao procedimento de calibração, fato que permite a absorção de um eventual desvio dos raios causados pela existência destas correlações. Um maior detalhamento sobre o procedimento de orientação relativa pode ser encontrado no item 6.3.1.

7.3 CALIBRAÇÃO AÉREA EM SERVIÇO

Para a realização do procedimento de calibração aérea em serviço foram selecionadas 11 imagens correspondentes a 3 faixas aéreas, as quais contemplaram os pontos de apoio e verificação implantados na área de estudo em Telêmaco Borba. Além dos 64 pontos levantados em campo foram adicionados 30 pontos fotogramétricos no bloco. Na Figura 34 é apresentada a distribuição dos pontos, a orientação das faixas de voo e a projeção das imagens aéreas na área de estudo.

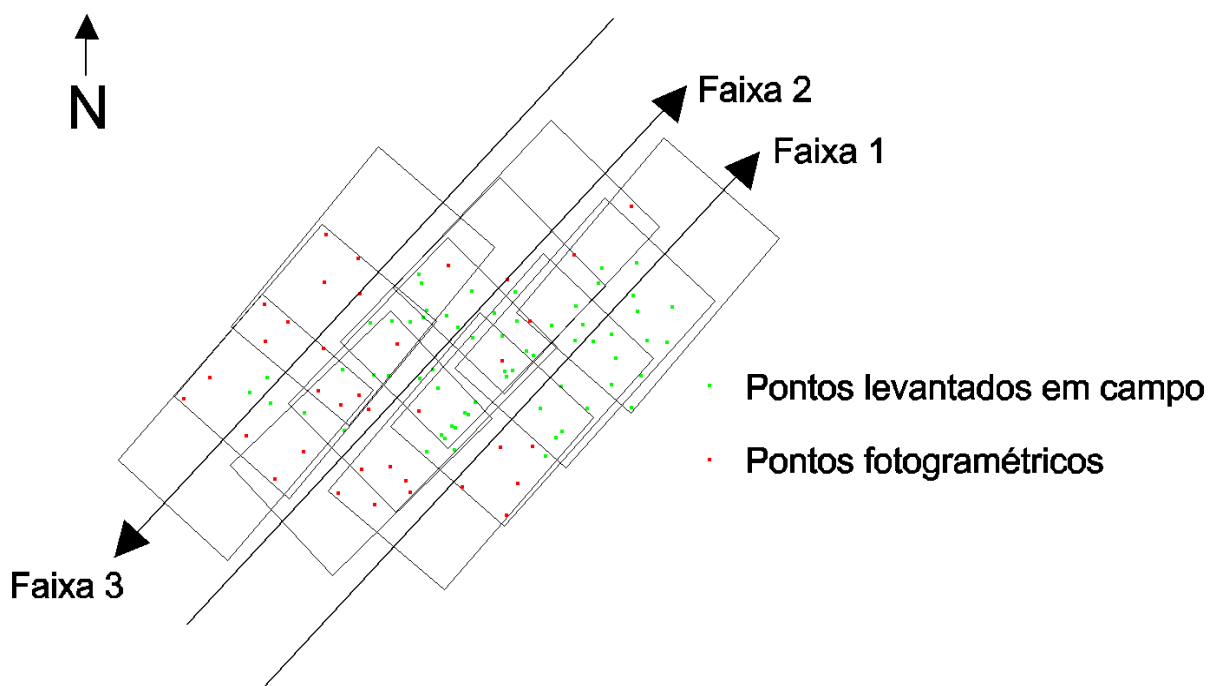


FIGURA 34 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS E DAS IMAGENS NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO EM TELÊMACO BORBA

FONTE: O autor (2012)

Na Tabela 16 são apresentadas as informações sobre as faixas de voo realizadas.

TABELA 16 - FAIXAS DE VOO REALIZADAS NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO AÉREA EM TELÊMACO BORBA

Faixa	Azimute (°)	Altura de voo (m)	Número de fotos
1	43	1.000	4
2	43	1.000	4
3	223	1.000	3

7.3.1.Experimentos de calibração aérea em serviço

Buscando determinar uma quantidade de pontos de apoio mínima para se executar o procedimento de calibração aérea em serviço, foram realizados 5 experimentos conforme descritos na Tabela 17.

TABELA 17 - EXPERIMENTOS DE CALIBRAÇÃO AÉREA EM SERVIÇO

Experimento	Nº de pontos de apoio plani-altimétricos utilizados na calibração
1	0
2	1
3	2
4	3
5	4

A Figura 35 ilustra a distribuição espacial dos pontos de apoio utilizados em cada experimento.

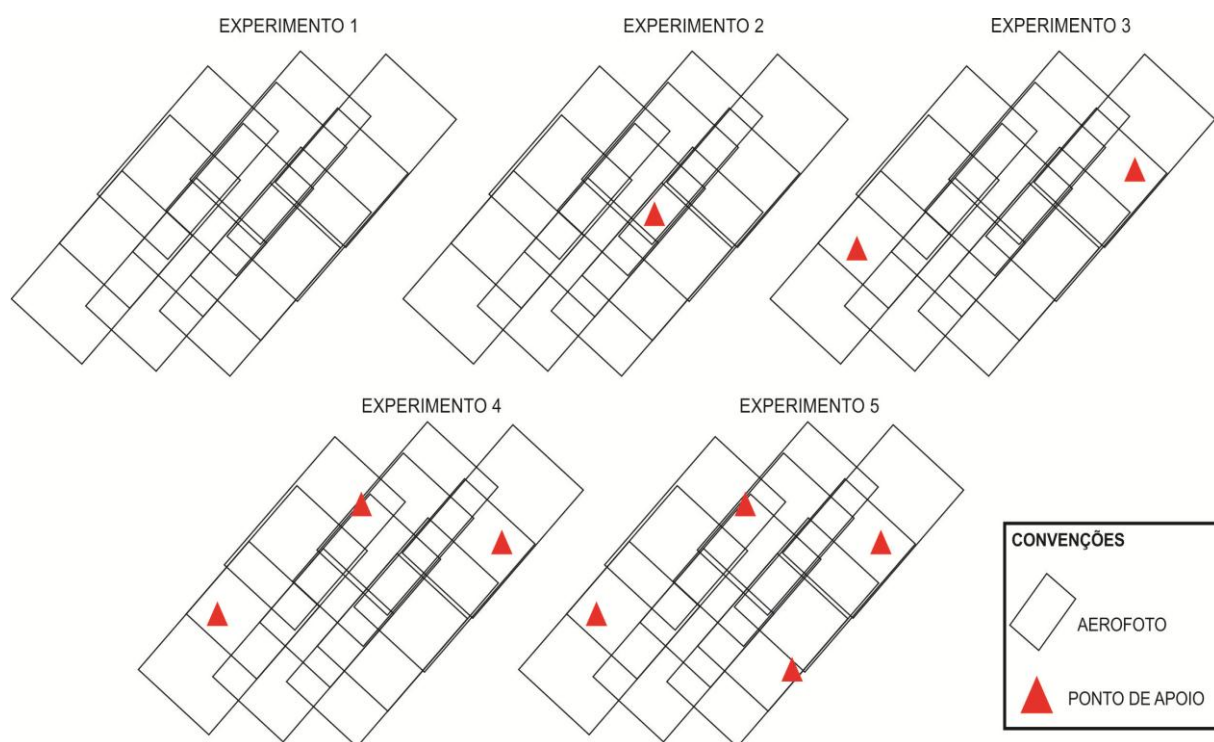


FIGURA 35 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS PONTOS DE APOIO UTILIZADOS EM CADA EXPERIMENTO DE CALIBRAÇÃO AÉREA EM SERVIÇO

FONTE: O autor (2012)

Os critérios adotados para a realização dos cinco experimentos de calibração em serviço foram os mesmos, sendo estes: atribuição do valor unitário para a variância *a priori*, o desvio padrão das fotocoordenadas igual a 0,004mm (equivalente a metade de um pixel), o desvio padrão das coordenadas dos pontos de apoio igual a 2cm, 2cm e 4cm respectivamente para X, Y e Z, e o desvio padrão

das posições dos CP da câmera ($\sigma X_0, \sigma Y_0, \sigma Z_0$) para os instantes de tomadas das imagens igual a 10cm.

Observaram-se para os cinco experimentos realizados, igualmente ao procedimento de calibração aérea independente, a não significância dos parâmetros k_3 e P_1 , sendo estes eliminados das etapas de ajustamento.

Na Tabela 18 estão apresentados os POI obtidos para cada experimento realizado e seus respectivos desvios padrão.

TABELA 18 - POI OBTIDOS COM O PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO AÉREA EM SERVIÇO

Experimento	c (mm)	x_{pp} (mm)	y_{pp} (mm)	k_1 (mm ⁻²)	k_2 (mm ⁻⁴)	P_2 (mm ⁻¹)
1	34,182 $\pm 0,115$	-0,078 $\pm 0,005$	-0,162 $\pm 0,015$	$-8,9791 e^{-5}$ $\pm 8,7873 e^{-7}$	$1,0061 e^{-7}$ $\pm 1,9111 e^{-9}$	$2,6498 e^{-5}$ $\pm 4,1610 e^{-6}$
2	34,286 $\pm 0,009$	-0,081 $\pm 0,004$	-0,147 $\pm 0,012$	$-9,0091 e^{-5}$ $\pm 8,6198 e^{-7}$	$1,0096 e^{-7}$ $\pm 1,8920 e^{-9}$	$2,6230 e^{-5}$ $\pm 4,1011 e^{-6}$
3	34,271 $\pm 0,008$	-0,084 $\pm 0,004$	-0,132 $\pm 0,010$	$-9,0225 e^{-5}$ $\pm 8,6047 e^{-7}$	$1,0117 e^{-7}$ $\pm 1,9083 e^{-9}$	$3,2491 e^{-5}$ $\pm 3,6812 e^{-6}$
4	34,273 $\pm 0,005$	-0,086 $\pm 0,004$	-0,125 $\pm 0,009$	$-9,0152 e^{-5}$ $\pm 8,5829 e^{-7}$	$1,0095 e^{-7}$ $\pm 1,9007 e^{-9}$	$3,6002 e^{-5}$ $\pm 2,7686 e^{-6}$
5	34,278 $\pm 0,004$	-0,081 $\pm 0,003$	-0,136 $\pm 0,009$	$-9,0460 e^{-5}$ $\pm 8,7797 e^{-7}$	$1,0151 e^{-7}$ $\pm 1,9437 e^{-9}$	$2,9556 e^{-5}$ $\pm 2,4567 e^{-6}$

C = distância focal, x_{pp}, y_{pp} = posição do ponto principal, k_1, k_2 = distorção radial simétrica, P_2 = distorção descentrada.

Os conjuntos de POI obtidos também foram transformados para o sistema de unidades em pixel e seguem apresentados na Tabela 19.

TABELA 19 - POI TRANSFORMADOS PARA O SISTEMA DE UNIDADES EM PIXEL (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)

Experimento	c (<i>pixel</i>)	x_{pp} (<i>pixel</i>)	y_{pp} (<i>pixel</i>)	k_1 (<i>pixel</i>)	k_2 (<i>pixel</i>)	P_2 (<i>pixel</i>)
1	4272,688	-9,738	-20,263	$-5,7466 e^{-9}$	$4,1208 e^{-16}$	$2,1198 e^{-7}$
2	4285,775	-10,125	-18,350	$-5,7659 e^{-9}$	$4,1354 e^{-16}$	$2,0984 e^{-7}$
3	4283,838	-10,438	-16,500	$-5,7744 e^{-9}$	$4,1441 e^{-16}$	$2,5993 e^{-7}$
4	4284,075	-10,763	-15,613	$-5,7697 e^{-9}$	$4,1351 e^{-16}$	$2,8801 e^{-7}$
5	4284,713	-10,063	-17,013	$-5,7895 e^{-9}$	$4,1580 e^{-16}$	$2,3645 e^{-7}$

Nas Figuras 36 e 37 são apresentadas, respectivamente, as curvas das distorções radial simétrica e descentrada obtidas para os cinco experimentos realizados. Percebe-se que as diferenças nas curvas das distorções para os cinco experimentos são muito pequenas.

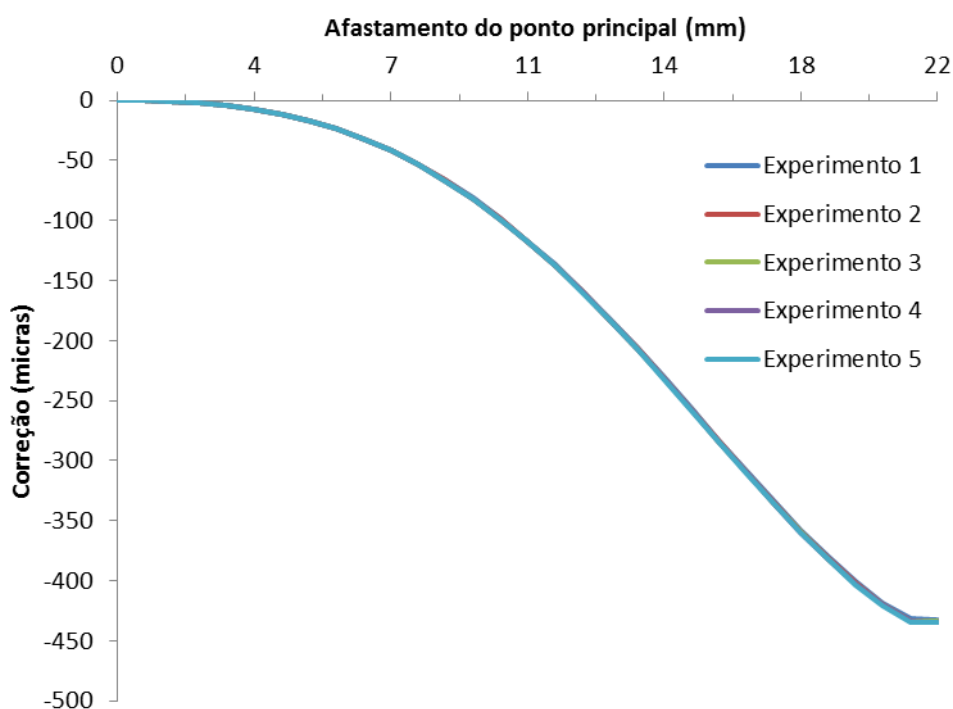


FIGURA 36 - CURVAS DA DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA PARA OS CINCO EXPERIMENTOS (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)

FONTE: O autor (2012)

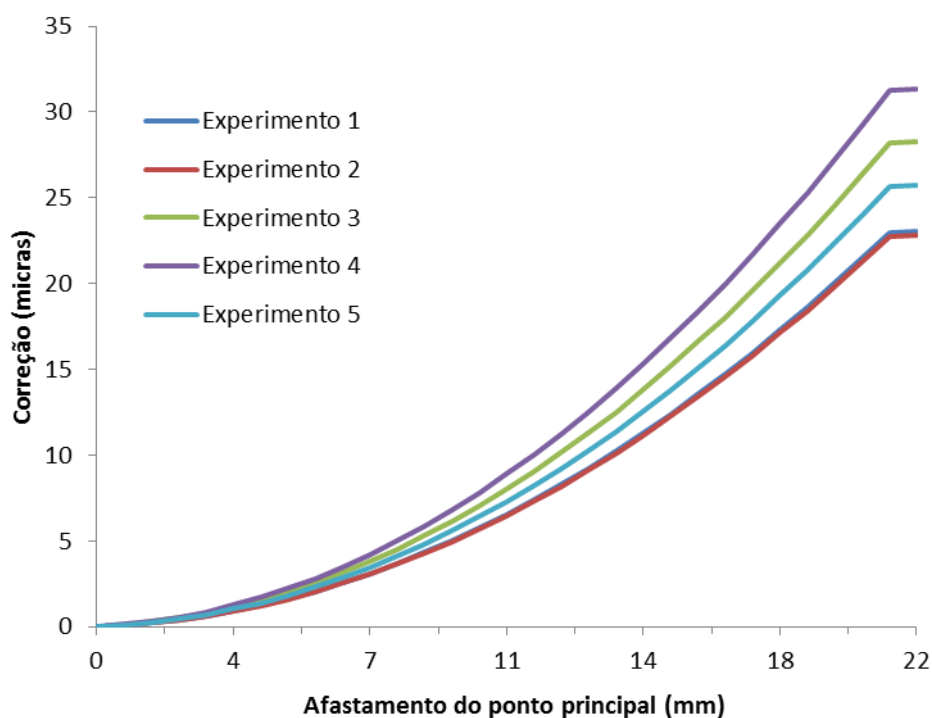


FIGURA 37 - CURVAS DA DISTORÇÃO DESCENTRADA PARA OS CINCO EXPERIMENTOS (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)

FONTE: O autor (2012)

Nas Tabelas 20, 21, 22, 23 e 24 são apresentadas as matrizes de correlação entre os POI obtidos.

TABELA 20 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DOS POI DO EXPERIMENTO 1 (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)

	c	x_{pp}	y_{pp}	k_1	k_2	P_2
c	1,00					
x_{pp}	0,12	1,00				
y_{pp}	0,25	-0,32	1,00			
k_1	-0,09	0,03	-0,08	1,00		
k_2	0,14	0,06	0,04	-0,96	1,00	
P_2	0,07	-0,23	0,63	0,01	0,01	1,00

Onde 1,00 = máxima correlação e 0,00 = nenhuma correlação.

TABELA 21 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DOS POI DO EXPERIMENTO 2 (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)

	c	x_{pp}	y_{pp}	k_1	k_2	P_2
c	1,00					
x_{pp}	0,00	1,00				
y_{pp}	0,24	-0,22	1,00			
k_1	-0,22	-0,07	0,04	1,00		
k_2	0,28	0,06	-0,03	-0,97	1,00	
P_2	0,26	-0,27	0,82	0,00	0,01	1,00

Onde 1,00 = máxima correlação e 0,00 = nenhuma correlação.

TABELA 22 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DOS POI DO EXPERIMENTO 3 (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)

	c	x_{pp}	y_{pp}	k_1	k_2	P_2
c	1,00					
x_{pp}	0,04	1,00				
y_{pp}	0,10	-0,30	1,00			
k_1	-0,36	-0,09	0,04	1,00		
k_2	0,34	0,08	-0,05	-0,98	1,00	
P_2	0,05	-0,47	0,73	0,04	-0,04	1,00

Onde 1,00 = máxima correlação e 0,00 = nenhuma correlação.

TABELA 23 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DOS POI DO EXPERIMENTO 4 (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)

	c	x_{pp}	y_{pp}	k_1	k_2	P_2
c	1,00					
x_{pp}	0,07	1,00				
y_{pp}	0,11	-0,14	1,00			
k_1	-0,57	-0,07	0,02	1,00		
k_2	0,53	0,05	-0,01	-0,98	1,00	
P_2	-0,06	-0,29	0,68	0,01	0,01	1,00

Onde 1,00 = máxima correlação e 0,00 = nenhuma correlação.

TABELA 24 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DOS POI DO EXPERIMENTO 5 (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)

	c	x_{pp}	y_{pp}	k_1	k_2	P_2
c	1,00					
x_{pp}	0,00	1,00				
y_{pp}	0,03	-0,07	1,00			
k_1	-0,65	-0,05	0,01	1,00		
k_2	0,60	0,03	-0,02	-0,98	1,00	
P_2	0,03	-0,14	0,70	-0,03	0,05	1,00

Onde 1,00 = máxima correlação e 0,00 = nenhuma correlação.

Analisando os cinco experimentos, observa-se que a correlação entre “ c ” e “ k_1 ” e “ k_2 ”, aumenta com a adição de pontos de apoio na calibração. As demais correlações observadas entre “ k_1 ” e “ k_2 ”, e entre “ y_{pp} ” e “ P_2 ” não apresentaram variações significativas para os diferentes experimentos, as mesmas também apresentaram semelhança com os valores obtidos no procedimento de calibração aérea independente. Tais correlações são desprezíveis uma vez que todos os POI

obtidos serão aplicados conjuntamente, diferentemente das correlações observadas entre os POI e os POE.

Nas Tabelas 25, 26, 27, 28 e 29 são apresentadas as médias absolutas das matrizes de correlação entre os POI e os POE das imagens obtidos após o processo de ajustamento.

TABELA 25 - MÉDIA ABSOLUTA DAS MATRIZES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMARA E OS POE DAS IMAGENS – EXPERIMENTO 1 (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)

	c	x_{pp}	y_{pp}	k_1	k_2	P_2
ω	0,21	0,20	0,70	0,06	0,03	0,56
φ	0,22	0,28	0,74	0,06	0,02	0,66
κ	0,15	0,35	0,26	0,02	0,04	0,37
X_0	0,03	0,04	0,03	0,01	0,01	0,02
Y_0	0,04	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01
Z_0	0,09	0,13	0,11	0,03	0,03	0,05

Onde 1,00 = máxima correlação e 0,00 = nenhuma correlação.

TABELA 26 - MÉDIA ABSOLUTA DAS MATRIZES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMARA E OS POE DAS IMAGENS – EXPERIMENTO 2 (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)

	c	x_{pp}	y_{pp}	k_1	k_2	P_2
ω	0,24	0,09	0,83	0,02	0,01	0,65
φ	0,31	0,38	0,86	0,06	0,03	0,72
κ	0,12	0,23	0,36	0,04	0,03	0,42
X_0	0,03	0,05	0,03	0,01	0,01	0,02
Y_0	0,01	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01
Z_0	0,14	0,14	0,11	0,03	0,03	0,05

Onde 1,00 = máxima correlação e 0,00 = nenhuma correlação.

TABELA 27 - MÉDIA ABSOLUTA DAS MATRIZES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMARA E OS POE DAS IMAGENS – EXPERIMENTO 3 (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)

	c	x_{pp}	y_{pp}	k_1	k_2	P_2
ω	0,09	0,12	0,87	0,03	0,04	0,63
φ	0,05	0,50	0,89	0,05	0,06	0,74
κ	0,05	0,32	0,38	0,07	0,07	0,50
X_0	0,02	0,04	0,02	0,01	0,01	0,02
Y_0	0,01	0,04	0,03	0,01	0,01	0,02
Z_0	0,05	0,12	0,14	0,03	0,03	0,07

Onde 1,00 = máxima correlação e 0,00 = nenhuma correlação.

TABELA 28 - MÉDIA ABSOLUTA DAS MATRIZES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMARA E OS POE DAS IMAGENS – EXPERIMENTO 4 (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)

	c	x_{pp}	y_{pp}	k_1	k_2	P_2
ω	0,14	0,16	0,87	0,01	0,01	0,57
φ	0,08	0,38	0,88	0,03	0,02	0,68
κ	0,07	0,22	0,30	0,06	0,05	0,38
X_0	0,02	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01
Y_0	0,01	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01
Z_0	0,08	0,14	0,14	0,03	0,03	0,04

Onde 1,00 = máxima correlação e 0,00 = nenhuma correlação.

TABELA 29 - MÉDIA ABSOLUTA DAS MATRIZES DE CORRELAÇÃO ENTRE OS POI DA CÂMARA E OS POE DAS IMAGENS – EXPERIMENTO 5 (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)

	c	x_{pp}	y_{pp}	k_1	k_2	P_2
ω	0,02	0,25	0,85	0,01	0,02	0,60
φ	0,03	0,33	0,88	0,02	0,02	0,67
κ	0,04	0,14	0,26	0,06	0,06	0,28
X_0	0,01	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01
Y_0	0,02	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01
Z_0	0,08	0,14	0,13	0,03	0,03	0,03

Onde 1,00 = máxima correlação e 0,00 = nenhuma correlação.

As mesmas correlações observadas no procedimento de calibração aérea independente podem ser observadas nos experimentos de calibração aérea em serviço, porém nestes últimos notam-se correlações existentes também entre Y_{pp}, P_2 e κ . Uma das hipóteses para a existência desta correlação é o fato de não terem sido tomadas imagens em faixas de voo cruzadas. Outra questão, ao compararmos as correlações entre os experimentos realizados nota-se que, quando utilizado nenhum ou apenas um ponto de apoio, a distância focal (c) apresenta correlação com os POE angulares (ω, φ, κ).

Conforme mencionado anteriormente, a metodologia utilizada nesta pesquisa prevê a determinação de parâmetros de orientação relativa posteriormente ao procedimento de calibração, fato que permite a absorção de um eventual desvio dos raios causados devido à presença destas correlações.

O teste estatístico do Qui-quadrado (χ^2) foi empregado dado um nível de significância de 95% e os resultados obtidos seguem apresentados na Tabela 30.

TABELA 30 - TESTE ESTATÍSTICO DO QUI-QUADRADO (χ^2) (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO)

Experimento	Graus de liberdade	Intervalo de confiança ($\alpha = 95\%$)	Variância a posteriori	Resultado
1	346	0,444 – 0,598	0,512	Aceito
2	349	0,444 – 0,598	0,512	Aceito
3	352	0,456 – 0,613	0,526	Aceito
4	355	0,455 – 0,611	0,525	Aceito
5	358	0,480 – 0,644	0,553	Aceito

Para análise da precisão foram obtidas as REMQ dos resíduos dos pontos de apoio, das posições das estações de exposição da câmara e das leituras das fotocoordenadas. Os resultados obtidos seguem apresentados na Tabela 31.

TABELA 31 - REMQ DOS RESÍDUOS PARA OS EXPERIMENTOS DE CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO

Experimento	REMQ - Pontos de apoio			REMQ - Estações de exposição			REMQ - Fotocoordenadas	
	E (m)	N (m)	H (m)	X_0 (m)	Y_0 (m)	Z_0 (m)	x (mm)	y (mm)
1	***	***	***	0,021	0,017	0,048	0,002	0,002
2	***	***	***	0,023	0,016	0,043	0,002	0,002
3	0,000	0,002	0,002	0,025	0,016	0,062	0,002	0,002
4	0,001	0,003	0,002	0,026	0,016	0,060	0,002	0,002
5	0,004	0,007	0,003	0,026	0,014	0,057	0,002	0,002

Para a análise da exatidão dos experimentos de calibração foram determinadas as médias e as REMQ das discrepâncias dos pontos de verificação implantados na área de estudo de Telêmaco Borba. Os resultados seguem apresentados na Tabela 32 e demonstrados graficamente nas Figuras 38 e 39.

TABELA 32 - REMQ DAS DISCREPÂNCIAS PARA OS EXPERIMENTOS DE CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO

Experimento	Média			REMQ		
	E (m)	N (m)	H (m)	E (m)	N (m)	H (m)
1	-0,214	0,142	3,327	0,264	0,258	3,347
2	0,091	0,013	-0,213	0,172	0,163	0,385
3	0,088	-0,048	0,435	0,133	0,127	0,500
4	0,109	0,055	0,387	0,153	0,142	0,468
5	0,068	-0,114	-0,008	0,201	0,183	0,362

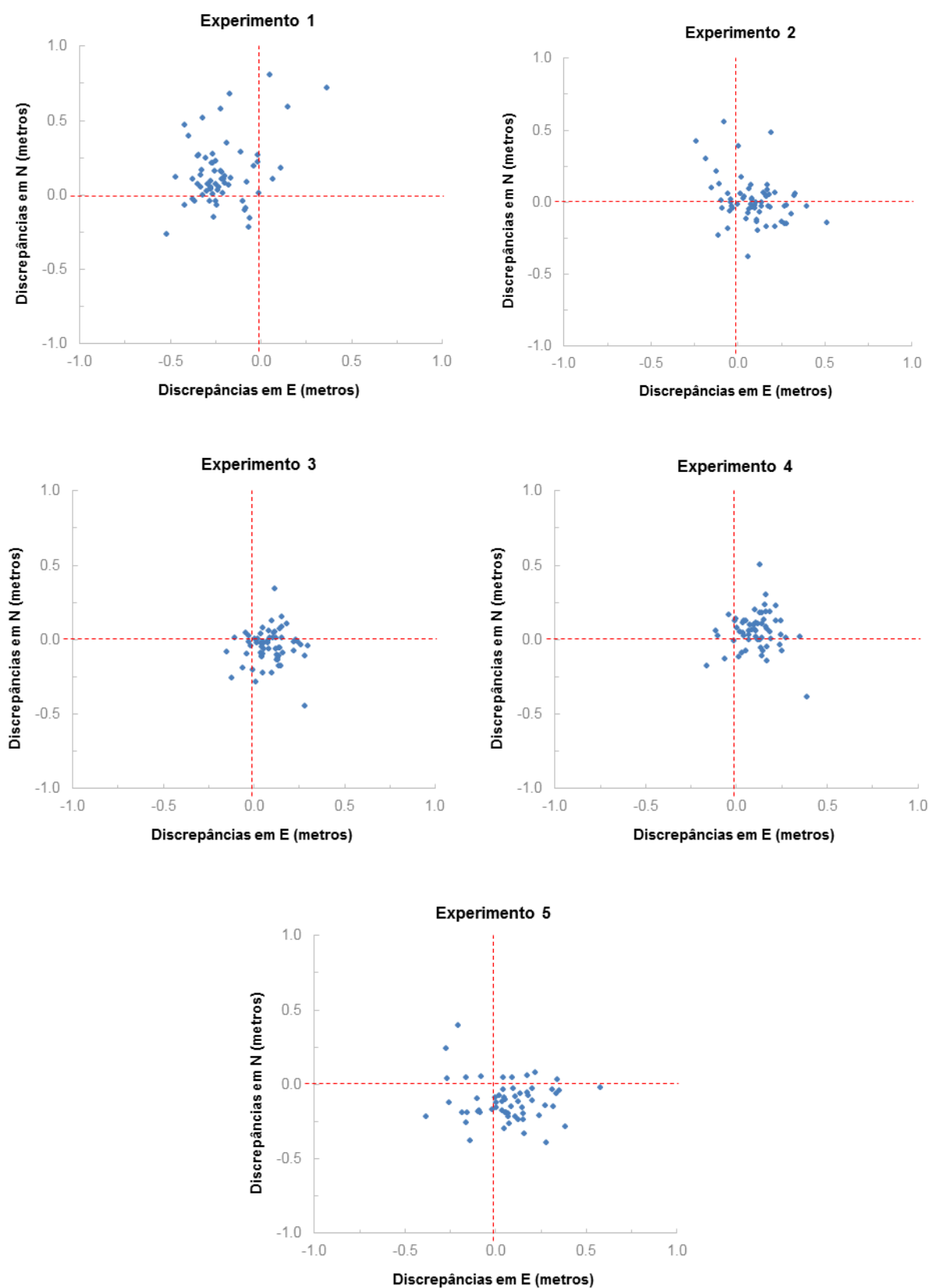


FIGURA 38 - GRÁFICOS DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO UTILIZADOS EM CADA EXPERIMENTO DE CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO

FONTE: O autor (2012)

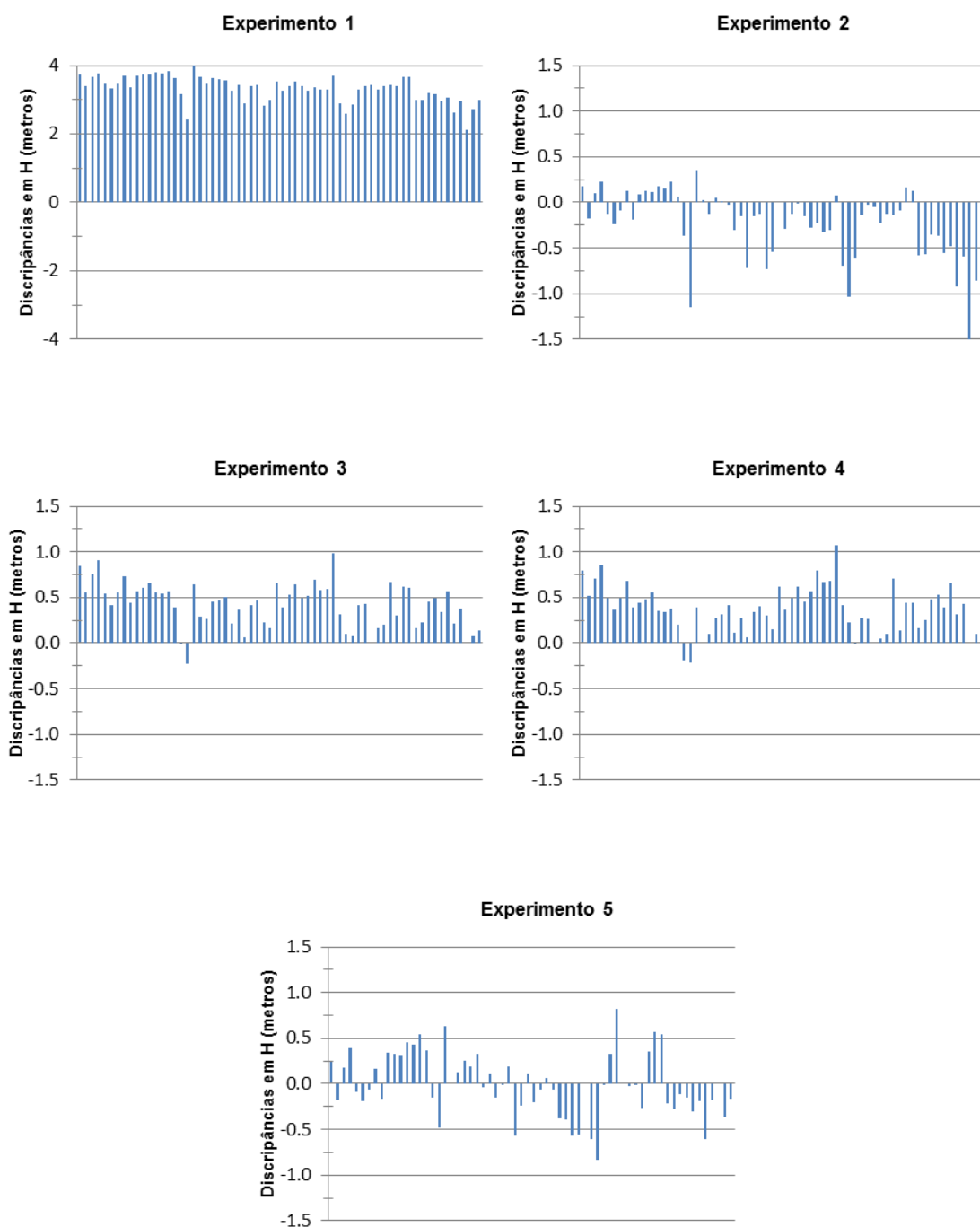


FIGURA 39 - GRÁFICOS DAS DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO UTILIZADOS EM CADA EXPERIMENTO DE CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO

FONTE: O autor (2012)

O valor estabelecido como máxima discrepância planimétrica é igual ao tamanho médio de um pixel no terreno, equivalente a 22 cm. Para o valor da máxima discrepância altimétrica foi estabelecido o valor equivalente a 57cm, obtido com base na equação apresentada (12) anteriormente, onde foram considerados os

seguintes parâmetros: $H = 1.000\text{m}$, $B = 401,22\text{m}$, $f = 35\text{mm}$ e $d_{px} = 0,008\text{mm}$ (equivalente ao tamanho de um pixel).

Ao analisarmos a REMQ obtida no experimento 1, percebe-se que a mesma extrapolou o valor máximo de discrepância altimétrica estabelecida, sendo este experimento considerado inadequado para a calibração aérea em serviço. Também analisando graficamente as discrepâncias, percebe-se que o único experimento que não apresentou tendência nos resultados plani-altimétricos foi o experimento de número 5, no qual foram utilizados 4 pontos de apoio para realizar a calibração da câmara.

O experimento 5 também apresentou as menores discrepâncias dos pontos de verificação, e foi adotado como condição mínima ideal para calibração da câmara pelo procedimento em serviço. Apenas os POI provenientes deste experimento foram utilizados nas demais etapas da pesquisa.

7.4 POI OBTIDOS PELOS DIFERENTES PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO

Na Tabela 33 seguem os POI obtidos pelos diferentes procedimentos de calibração e suas respectivas diferenças. Onde está indicado “procedimento 1” consideram-se os POI obtidos pelo procedimento de calibração aérea independente, e onde está indicado “procedimento 2” consideram-se os POI obtidos pelo procedimento de calibração aérea em serviço.

TABELA 33 - POI OBTIDOS PELOS DOIS PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO AÉREA.

Procedimento	c (mm)	x_{pp} (mm)	y_{pp} (mm)	k_1 (mm ⁻²)	k_2 (mm ⁻⁴)	P_2 (mm ⁻¹)
1	34,250	-0,067	-0,207	$-9,1161 e^{-5}$	$1,0284 e^{-7}$	$2,7447 e^{-5}$
2	34,278	-0,081	-0,136	$-9,0460 e^{-5}$	$1,0151 e^{-7}$	$2,9556 e^{-5}$
Diferenças	0,028	-0,014	0,071	$7,0100 e^{-7}$	$-1,3300 e^{-9}$	$2,1090 e^{-6}$

Podemos perceber diferenças significativas entre os dois conjuntos de parâmetros, sendo a de maior significância observada em " y_{pp} ". Conforme observado nas matrizes de correlação apresentadas anteriormente, existe uma forte correlação entre " y_{pp} " e " P_2 ", fato que justifica um parâmetro estar absorvendo boa parte do valor do outro. Outras hipóteses apontadas para tal discrepância seriam: a não aquisição de imagens em faixas cruzadas no procedimento de calibração em serviço; e a grande diferença de tempo (aproximadamente 11 meses) entre a realização de cada um dos aerolevantamentos de calibração, demonstrando a não estabilidade da câmara. Outros experimentos seriam necessários a fim de serem confirmadas tais questões.

7.5 MOSAICOS DE ORTOIMAGENS

Para obtenção dos mosaicos de ortoimagens da área de estudo em Telêmaco Borba, foram selecionadas 22 imagens aéreas, destas, 11 foram utilizadas na etapa anterior de calibração aérea em serviço. As imagens também recobriram os 64 pontos levantados em Telêmaco Borba, e, diferentemente do procedimento de calibração, nessa etapa tais pontos tiveram a finalidade apenas de verificação planimétrica. Na Figura 40 é apresentada a distribuição dos pontos de verificação, a orientação das faixas de voo, a projeção das imagens na área de estudo e a área definida para obtenção do mosaico de ortoimagens. Na Tabela 34 seguem as informações das faixas de voo realizadas.

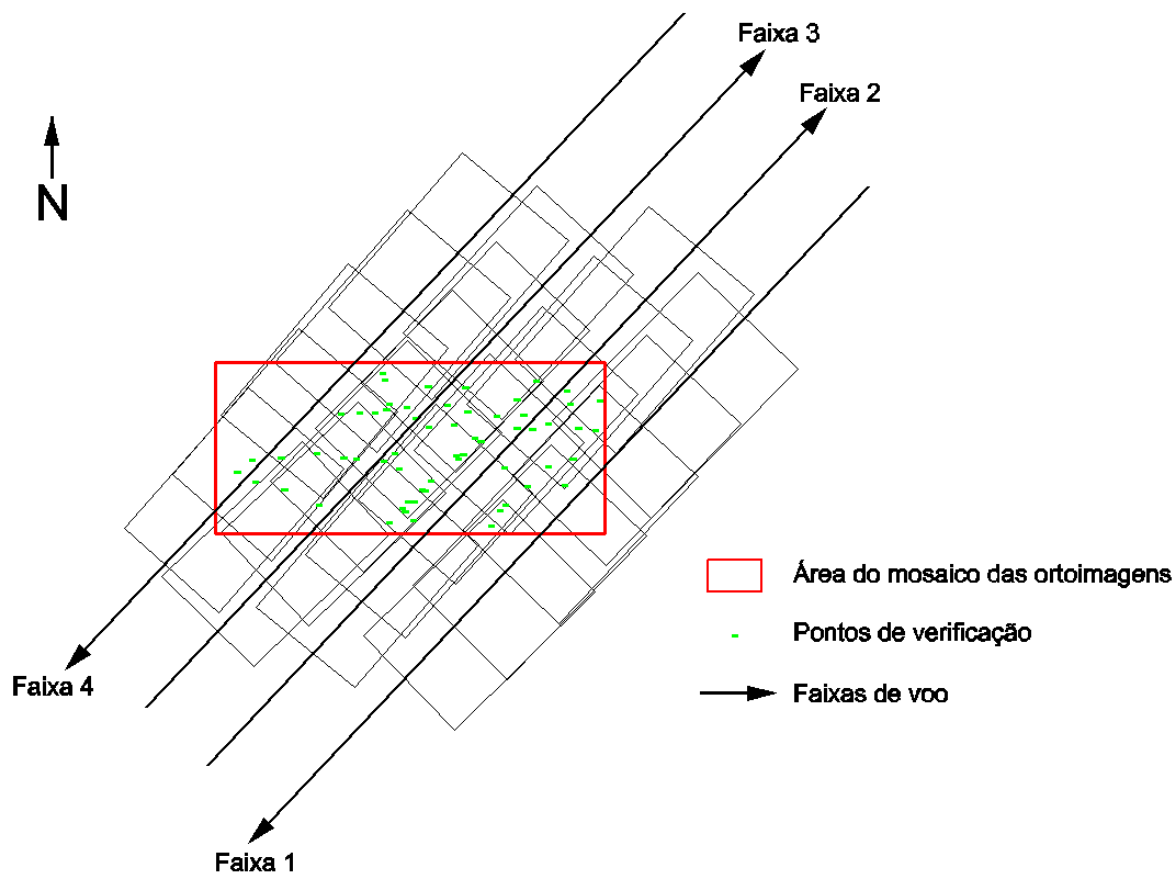


FIGURA 40 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO, ORIENTAÇÃO DAS FAIXAS DE VOO, PROJEÇÃO DAS IMAGENS NA ÁREA DE ESTUDO E ÁREA DEFINIDA PARA OBTENÇÃO DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS

FONTE: O autor (2012)

TABELA 34 - DESCRITIVO DAS FAIXAS DE VOO UTILIZADAS NA GERAÇÃO DAS ORTOIMAGENS DA ÁREA DE ESTUDO EM TELÊMACO BORBA.

Faixa	Azimute (°)	Altura de voo (m)	Número de fotos
1	223	1.000	5
2	43	1.000	6
3	43	1.000	6
4	223	1.000	5

7.5.1. Orientação relativa da câmara

A orientação relativa da câmara foi obtida através de um processo de aerotriangulação. Foram utilizados 36 pontos fotogramétricos e nenhum ponto de

apoio. Todos os 36 pontos fotogramétricos corresponderam a pontos fotoidentificáveis localizados no terreno, como por exemplo, faixas de segurança no asfalto. Tal restrição, conforme comentado anteriormente, é devida ao software *TerraPhoto* utilizar o MDT proveniente do SLSA como apoio no espaço objeto. Devido às imagens utilizadas terem sido obtidas em dois aerolevantamentos, foram determinados dois conjuntos de parâmetros de orientação relativa ($\Delta\kappa, \Delta\varphi, \Delta\omega$) para cada conjunto de POI proveniente dos dois procedimentos de calibração. Ao todo foram obtidos quatro conjuntos de parâmetros de orientação relativa e os mesmos seguem apresentados na Tabela 35.

TABELA 35 - CONJUNTOS DE PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO RELATIVA.

POI	Data do aerolevantamento	Parâmetros de orientação relativa		
		$\Delta\kappa$	$\Delta\varphi$	$\Delta\omega$
Calibração Independente	30/06/2010	-1,9627 °	0,3184 °	0,6692 °
	01/07/2010	-1,9744 °	0,3244 °	0,6551 °
Calibração em Serviço	30/06/2010	-1,9587 °	0,3067 °	0,7740 °
	01/07/2010	-1,9868 °	0,3083 °	0,7736 °

As maiores diferenças observadas entre os parâmetros de orientação relativa obtidos com os POI provenientes dos dois procedimentos de calibração, são observadas no parâmetro $\Delta\omega$ (aproximadamente 0,1°). Podemos atribuir esse fato, principalmente as diferenças observadas pela posição do ponto principal obtida de cada procedimento de calibração, conforme visto no item 7.4.

Além dos parâmetros de orientação relativa por voo de aerolevantamento, também foram determinados os mesmos por imagem aérea. Tais parâmetros apresentam-se na Tabela 36.

TABELA 36 - PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO RELATIVA OBTIDOS PARA CADA INSTANTE DE AQUISIÇÃO DAS IMAGENS AÉREAS

Data do Voo	Imagem	Calibração independente			Calibração em serviço		
		$\Delta\kappa$	$\Delta\varphi$	$\Delta\omega$	$\Delta\kappa$	$\Delta\varphi$	$\Delta\omega$
30/06/10	1	-1,9607	0,2894	0,6712	-1,9647	0,2917	0,7880
	2	-1,9417	0,2984	0,6812	-1,9437	0,2967	0,7730
	3	-1,9477	0,3124	0,6942	-1,9427	0,3077	0,7670
	4	-1,9687	0,3344	0,7042	-1,9497	0,3127	0,7670
	5	-1,9567	0,3564	0,6932	-1,9487	0,3037	0,7700
	6	-2,0017	0,2954	0,6522	-2,0107	0,3007	0,7860
	7	-1,9917	0,2944	0,6462	-2,0057	0,2967	0,7730
	8	-1,9857	0,3084	0,6552	-1,9877	0,3097	0,7660
	9	-1,9867	0,3234	0,6582	-1,9797	0,3137	0,7600
	10	-1,9957	0,3404	0,6512	-1,9807	0,3067	0,7530
	11	-2,0017	0,3684	0,6512	-1,9567	0,2957	0,7690
01/07/10	12	-1,9814	0,2744	0,6761	-1,9938	0,3133	0,7706
	13	-1,9794	0,2904	0,6641	-1,9848	0,3043	0,7736
	14	-1,9654	0,3004	0,6731	-1,9678	0,3113	0,7666
	15	-1,9744	0,3134	0,6621	-1,9778	0,2973	0,7616
	16	-1,9554	0,3354	0,6961	-1,9558	0,3303	0,7716
	17	-1,9314	0,3524	0,6471	-1,9228	0,2833	0,7686
	18	-1,9284	0,3034	0,6371	-1,9498	0,3093	0,7716
	19	-1,9564	0,3104	0,6331	-1,9758	0,3113	0,7636
	20	-1,9734	0,3264	0,6231	-1,9818	0,3053	0,7626
	21	-1,9804	0,3564	0,6271	-1,9678	0,3073	0,7736
	22	-1,9694	0,3634	0,6361	-1,9428	0,3133	0,7566

7.5.2.Obtenção dos mosaicos de ortoimagens

Através do uso do software comercial *TerraPhoto* foram obtidos 4 mosaicos de ortoimagens, sendo dois com a utilização dos POI provenientes da calibração

aérea independente e dois com a utilização dos POI provenientes da calibração aérea em serviço. Foram obtidos dois mosaicos de ortoimagens com a utilização dos POI provenientes de cada procedimento de calibração, tendo em vista avaliar o método de posicionamento relativo por imagem e por voo.

Cada mosaico de ortoimagens foi obtido a partir da mosaicagem das 22 imagens aéreas ortorretificadas da área de estudo em Telêmaco Borba. O software, automaticamente, ortorretifica as imagens e, com base nas áreas de superposição lateral e longitudinal, utiliza a região mais próxima ao centro de cada imagem para compor o mosaico. Isso permite uma menor influência do efeito causado pela perspectiva central das imagens e das distorções de lentes. A região utilizada de cada ortoimagem na composição do mosaico se assemelha a um hexágono, como pode ser observada na Figura 41 onde cada região de adjacência, ou seja, o limite de utilização entre uma ortoimagem e outra, é representada pela cor amarela.

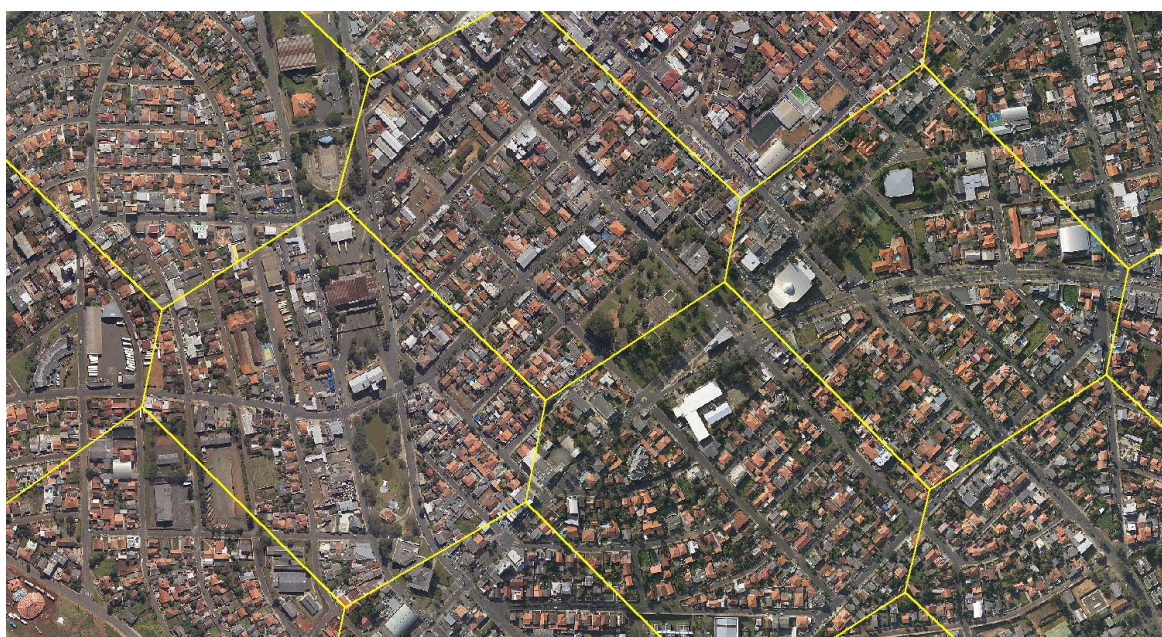


FIGURA 41 - REGIÕES UTILIZADAS DE CADA ORTOIMAGEM NA COMPOSIÇÃO DO MOSAICO
FONTE: O autor (2012)

O software ainda permite que sejam editados os trechos de adjacências das ortoimagens visando, por exemplo, que estes não cortem edificações. Tal edição é comum quando gerado um mosaico de ortoimagens convencionais obtidas a partir de um MDT. Este procedimento de edição não foi realizado na presente pesquisa, porém numa análise visual percebemos uma melhor sensação de continuidade dos

mosaicos de ortoimagens obtidos com os parâmetros de orientação relativa por imagem. Um exemplo de uma área de adjacência entre duas ortoimagens pode ser observado na Figura 42.



FIGURA 42 - EXEMPLO DE UMA ÁREA DE ADJACÊNCIA ENTRE DUAS ORTOIMAGENS OBTIDAS PELOS DIFERENTES PROCEDIMENTOS DE APLICAÇÃO DA ORIENTAÇÃO RELATIVA

FONTE: O autor (2012)

O sistema de projeção cartográfica adotado foi o UTM (Universal Transversa de Mercator) com projeção no fuso 22 sul e o SGR (Sistema Geodésico de Referência) foi o SIRGAS2000.

7.5.3.Exatidão dos mosaicos de ortoimagens

Para avaliação da acurácia planimétrica dos mosaicos de ortoimagens foram utilizados 58 pontos fotoidentificáveis levantados em Telêmaco Borba do total de 64. Os demais pontos de verificação não foram utilizados devido a dificuldades de identificação dos mesmos nos mosaicos de ortoimagens. As REMQ das discrepâncias dos pontos de verificação obtidas para cada mosaico seguem demonstradas na Tabela 37.

TABELA 37 - REMQ DAS DISCREPÂNCIAS POR COMPONENTE PLANIMÉTRICA DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DOS MOSAICOS DE ORTOIMAGENS

Mosaico de Ortoimagens	POI	Orientação Relativa	REMQ	
			E (m)	N (m)
1	Calibração independente	por voo	0,28	0,31
2		por imagem	0,38	0,25
3	Calibração em serviço	por voo	0,36	0,26
4		por imagem	0,34	0,18

Na Figura 43 seguem ilustradas as discrepâncias dos pontos de verificação obtidos para cada um dos mosaicos de ortomagens.

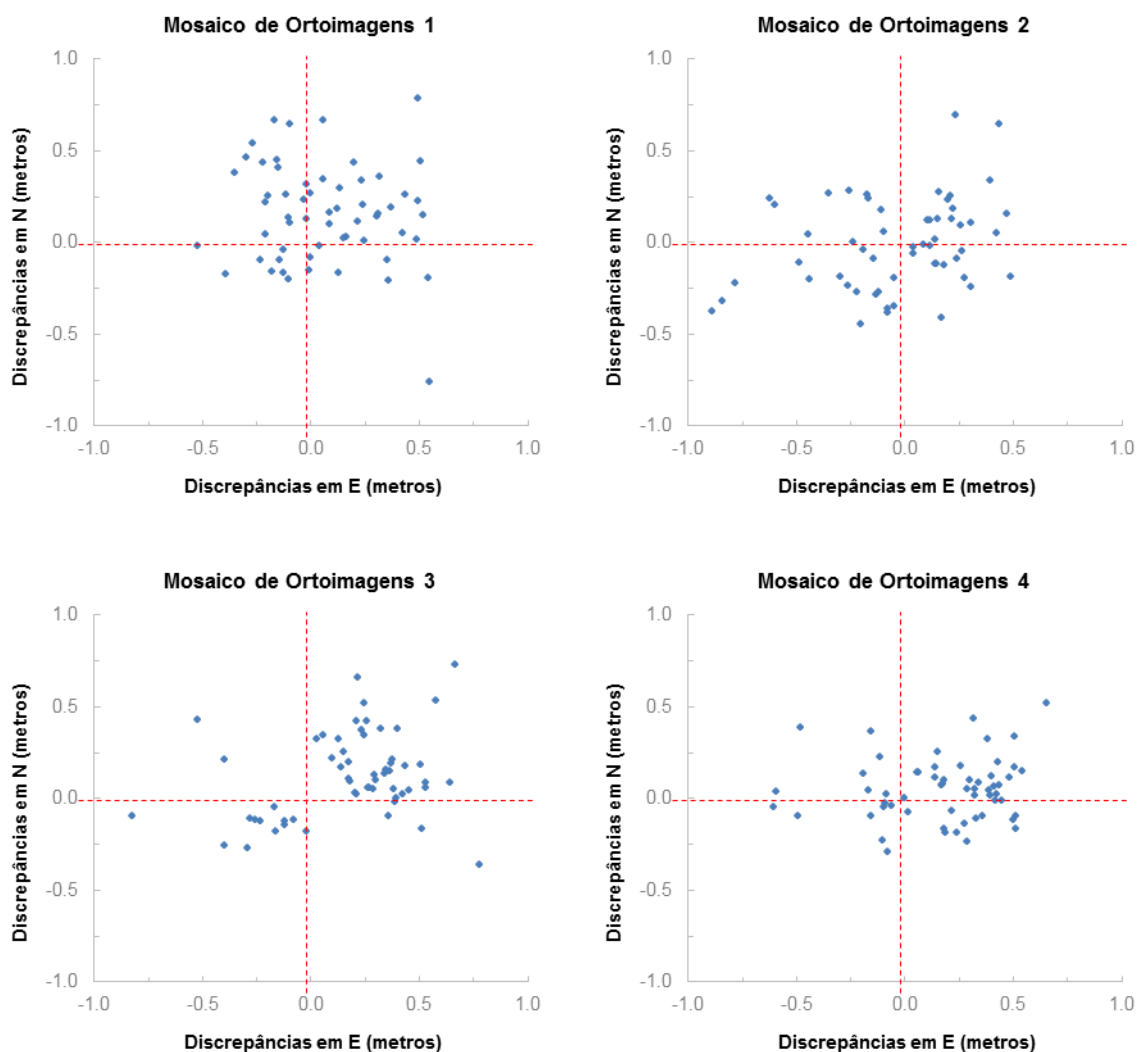


FIGURA 43 - GRÁFICOS DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DOS MOSAICOS DE ORTOIMAGENS

FONTE: O autor (2012)

Ao analisarmos a acurácia obtida com a aplicação da orientação relativa da câmara para cada instante de tomada das imagens, concluímos que esta não é necessariamente melhor que a obtida com a aplicação da orientação relativa por voo. Porém, percebemos uma leve tendência nos resultados apresentados graficamente na Figura 43 dos mosaicos de ortoimagens “1” e “3”.

Admitindo a precisão de 0,5 pixel na leitura das coordenadas nas ortoimagens, podemos considerar, uma vez que a resolução espacial das mesmas é igual a 22cm, a não significância das diferenças das REMQ obtidas pelos diferentes mosaicos de ortoimagens.

As coordenadas dos pontos de verificação confrontadas com as coordenadas obtidas dos mosaicos de ortoimagens podem ser visualizadas nos Apêndices 3,4,5 e 6.

7.5.4.Avaliação dos mosaicos de ortoimagens

O planejamento do aerolevantamento realizado em Telêmaco Borba visou a obtenção de produtos cartográficos na escala de representação cartográfica 1:2.000. Considerando esta escala, de acordo com as especificações do PEC, seguem os valores limites planimétricos admitidos no espaço objeto para cada classe (TABELA 38):

TABELA 38 - VALORES LIMITES ADMITIDOS PELO PEC PARA A ESCALA 1:2.000

Classe	PEC	Desvio Padrão
A	1,0m	0,6m
B	1,6m	1,0m
C	2,0m	1,2m

Na Tabela 39 seguem demonstrados, as médias e os desvios padrão das discrepâncias por componente planimétrica (E,N), obtidos para cada mosaico de ortoimagens. A utilização das componentes “E” e “N” é devido à adoção do sistema de projeção cartográfica UTM.

TABELA 39 - MÉDIA E DESVIO PADRÃO PARA CADA COMPONENTE PLANIMÉTRICA DOS MOSAICOS DE ORTOIMAGENS

Mosaico de Ortoimagens	POI	Orientação Relativa	Média (E)	Média (N)	Desvio Padrão (E)	Desvio Padrão (N)
1	Calibração independente	por voo	0,07m	0,16m	0,27m	0,27m
2		por imagem	-0,07m	-0,02m	0,38m	0,25m
3	Calibração em serviço	por voo	0,18m	0,12m	0,31m	0,23m
4		por imagem	0,17m	0,05m	0,29m	0,17m

Na Tabela 40 seguem demonstradas as médias e os desvios padrão planimétricos, obtidos a partir dos vetores resultantes das discrepâncias entre os pontos de verificação e os homólogos obtidos dos mosaicos de ortofotomontagens.

TABELA 40 - MÉDIAS E DESVIOS PADRÃO DOS VETORES RESULTANTES PLANIMÉTRICOS DOS MOSAICOS DE ORTOIMAGENS

Mosaico de Ortoimagens	POI	Orientação Relativa	Média (m)	Desvio Padrão (m)
1	Calibração independente	por voo	0,37	0,20
2		por imagem	0,38	0,25
3	Calibração em serviço	por voo	0,41	0,18
4		por imagem	0,34	0,17

Na Figura 44 seguem demonstradas graficamente as discrepâncias planimétricas obtidas para os mosaicos de ortofotomontagens, com a referência do limite planimétrico do PEC para a escala de representação cartográfica 1:2.000. Na figura considera-se a cor verde como “Classe A”, a cor laranja como “Classe B” e a cor vermelha como “Classe C”.

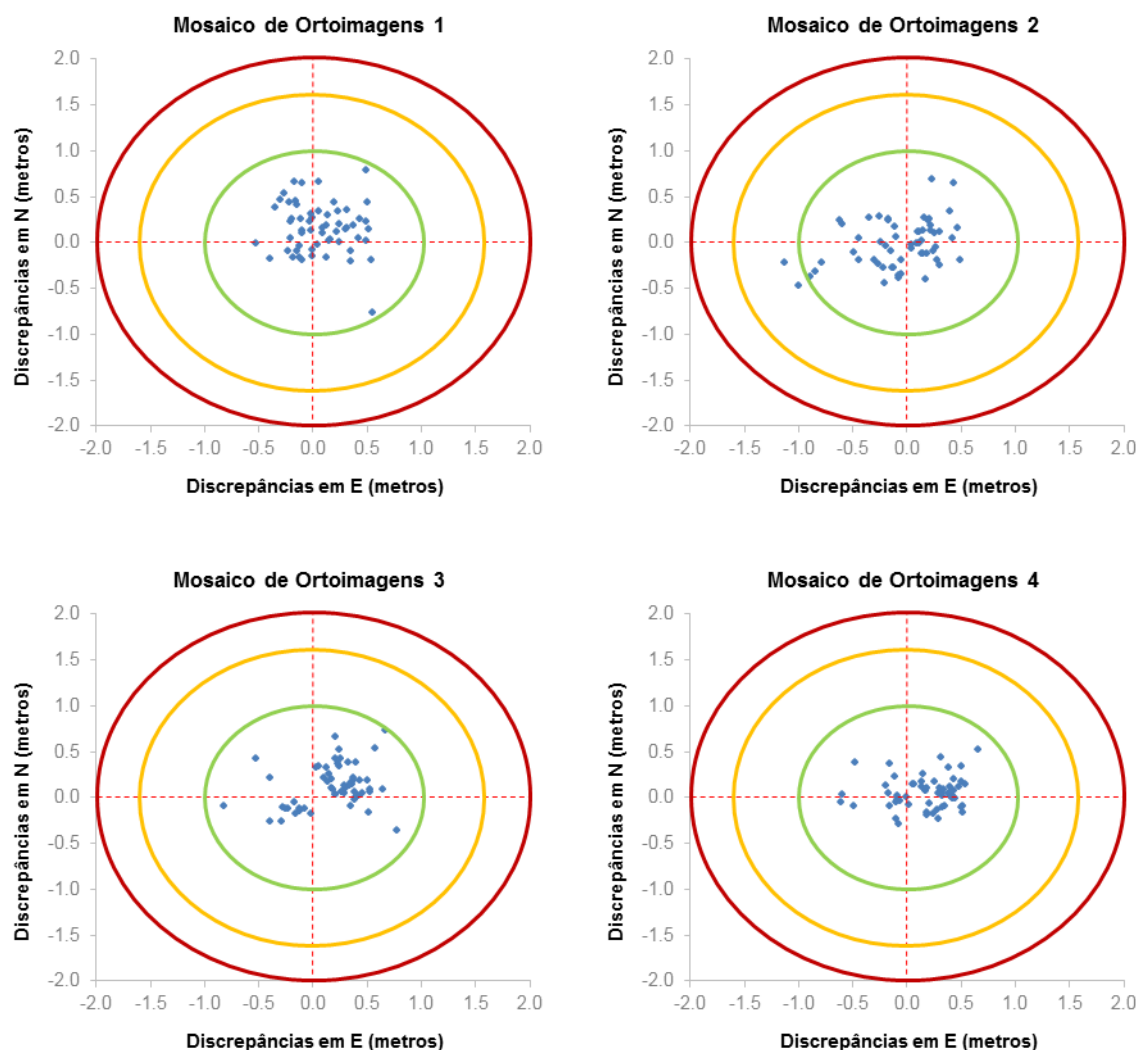


FIGURA 44 - GRÁFICOS DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DOS MOSAICOS DE ORTOIMAGENS COM A REFERÊNCIA DOS LIMITES DO PEC PARA A ESCALA 1:2.000

FONTE: O autor (2012)

Com base no exposto fica evidente que os 4 mosaicos de ortoimagens obtidos atenderam o PEC com classificação “A” para a escala 1:2.000. A fim de demonstrar até qual escala de representação os mosaicos de ortoimagens atenderiam as especificações do PEC, foi empregada a estimativa intervalar dada pela distribuição *t* de *Student* para avaliar a acurácia, e para analisar a precisão utilizou-se a estimativa intervalar dada pela distribuição do Qui-quadrado (χ^2).

Foram avaliadas os mosaicos de ortoimagens segundo as escalas de representação cartográfica 1:500, 1:1.000, 1:1.500 e 1:2000, e na Tabela 41 seguem os valores admitidos pelo PEC considerando estas escalas.

TABELA 41 - VALORES LIMITES ADMITIDOS PELO PEC PARA AS ESCALAS 1:500, 1:1.000, 1:1.500 E 1:2000

Escala	Classe	PEC	Desvio Padrão
1:500	A	0,25m	0,15m
	B	0,40m	0,25m
	C	0,50m	0,30m
1:1.000	A	0,50m	0,30m
	B	0,80m	0,50m
	C	1,00m	0,60m
1:1.500	A	0,75m	0,45m
	B	1,20m	0,75m
	C	1,50m	0,90m
1:2.000	A	1,00m	0,60m
	B	1,60m	1,00m
	C	2,00m	1,20m

7.5.4.1. Avaliação da acurácia dos mosaicos de ortoimagens

A avaliação da acurácia dos mosaicos de ortoimagens foi realizada com o emprego da distribuição de probabilidade t de *Student*. Buscou-se verificar, admitindo 90% de probabilidade, se estatisticamente a média das discrepâncias é considerada igual a zero, ou seja, os dados não apresentaram uma tendência significativa.

Verifica-se se as médias das discrepâncias das ortoimagens ($\bar{\varepsilon}$) são iguais ou diferem do valor “0”, confrontando-se as hipóteses H_0 e H_1 conforme seguem descritas.

$$H_0 : \quad \bar{\varepsilon} = 0 \quad \text{versus} \quad H_1 : \quad \bar{\varepsilon} \neq 0$$

Com a rejeição da hipótese H_0 emprega-se a equação (13) relacionada com a distribuição t de *Student*, a fim de avaliar se o mosaico de ortoimagens atende ao PEC quanto à acurácia, admitindo um nível de confiança de 90%.

$$t = \frac{\bar{\varepsilon} - \varepsilon_{PEC}}{S} \sqrt{n} \quad (13)$$

Onde, $\bar{\varepsilon}$ equivale ao valor médio das discrepâncias das amostras apresentado na Tabela 40, ε_{PEC} é igual ao valor limite conforme as especificações do PEC quanto à escala e classe apresentadas na Tabela 41, S é o desvio padrão amostral também apresentado na Tabela 40, e n equivale ao tamanho da amostra que é igual a “58”.

Quando rejeitada a hipótese H_0 comparam-se os valores amostrais da distribuição t de *Student* (t) ao valor teórico (t_α), sendo este último, para um tamanho de amostra igual a “58” e admitindo um intervalo de confiança de 90%, igual a “1,30”.

Os resultados obtidos seguem apresentados nas Tabelas 42, 43, 44 e 45, e para fins de entendimento a numeração dos mosaicos de ortoimagens segue conforme previamente descrita na Tabela 37.

TABELA 42 - AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA PLANIMÉTRICA DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 1 SEGUNDO O PEC

Mosaico de Ortoimagens	Escala	Classificação	Hipótese H_0	t	Atende ao PEC
1	1:500	A	Rejeitada	4,57	Não
		B	Rejeitada	-1,14	Sim
		C	Rejeitada	-4,95	Sim
	1:1.000	A	Rejeitada	-4,95	Sim
		B	Rejeitada	-16,37	Sim
		C	Rejeitada	-23,99	Sim
	1:1.500	A	Rejeitada	-14,47	Sim
		B	Rejeitada	-31,61	Sim
		C	Rejeitada	-43,03	Sim
	1:2.000	A	Rejeitada	-23,99	Sim
		B	Rejeitada	-46,84	Sim
		C	Rejeitada	-62,07	Sim

TABELA 43 - AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA PLANIMÉTRICA DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 2 SEGUNDO O PEC

Mosaico de Ortoimagens	Escala	Classificação	Hipótese H_0	t	Atende ao PEC
2	1:500	A	Rejeitada	3,96	Não
		B	Rejeitada	-0,61	Sim
		C	Rejeitada	-3,66	Sim
	1:1.000	A	Rejeitada	-3,66	Sim
		B	Rejeitada	-12,79	Sim
		C	Rejeitada	-18,89	Sim
	1:1.500	A	Rejeitada	-11,27	Sim
		B	Rejeitada	-24,98	Sim
		C	Rejeitada	-34,12	Sim
	1:2.000	A	Rejeitada	-18,89	Sim
		B	Rejeitada	-37,16	Sim
		C	Rejeitada	-49,35	Sim

TABELA 44 - AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA PLANIMÉTRICA DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 3 SEGUNDO O PEC

Mosaico de Ortoimagens	Escala	Classificação	Hipótese H_0	t	Atende ao PEC
3	1:500	A	Rejeitada	6,77	Não
		B	Rejeitada	0,42	Sim
		C	Rejeitada	-3,81	Sim
	1:1.000	A	Rejeitada	-3,81	Sim
		B	Rejeitada	-16,50	Sim
		C	Rejeitada	-24,96	Sim
	1:1.500	A	Rejeitada	-14,39	Sim
		B	Rejeitada	-33,42	Sim
		C	Rejeitada	-46,12	Sim
	1:2.000	A	Rejeitada	-24,96	Sim
		B	Rejeitada	-50,35	Sim
		C	Rejeitada	-67,27	Sim

TABELA 45 - AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA PLANIMÉTRICA DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 4 SEGUNDO O PEC

Mosaico de Ortoimagens	Escala	Classificação	Hipótese H_0	t	Atende ao PEC
4	1:500	A	Rejeitada	4,03	Não
		B	Rejeitada	-2,69	Sim
		C	Rejeitada	-7,17	Sim
	1:1.000	A	Rejeitada	-7,17	Sim
		B	Rejeitada	-20,61	Sim
		C	Rejeitada	-29,57	Sim
	1:1.500	A	Rejeitada	-18,37	Sim
		B	Rejeitada	-38,53	Sim
		C	Rejeitada	-51,97	Sim
	1:2.000	A	Rejeitada	-29,57	Sim
		B	Rejeitada	-56,45	Sim
		C	Rejeitada	-74,37	Sim

Para todos os mosaicos de ortoimagens a acurácia planimétrica atingiu uma classificação bem superior a inicialmente proposta atendendo a escala 1:2.000. Os mosaicos de ortoimagens obtiveram classificação “A” a partir da escala 1:1.000 e classificação “B” a partir da escala 1:500, sem apresentar tendência significativa admitindo 90% de probabilidade.

7.5.4.2. Avaliação da precisão dos mosaicos de ortoimagens

Visando a análise da precisão dos mosaicos de ortoimagens, segundos os critérios estabelecidos pelo PEC, empregou-se a distribuição do Qui-quadrado (χ^2). Comparam-se as variâncias obtidas das ortoimagens e as pré-estabelecidas pelo PEC, confrontando-se as hipóteses H_0 e H_1 conforme seguem descritas.

$$H_0 : S^2 \leq \sigma^2_0 \quad \text{versus} \quad H_1 : S^2 > \sigma^2_0$$

Onde, S^2 é a variância da amostra obtida a partir dos valores apresentados na Tabela 40, e σ^2_0 é a variância populacional esperada, a qual equivale aos valores definidos a partir dos critérios de precisão estabelecidos pelo PEC conforme apresentados na Tabela 41.

Com a rejeição da hipótese H_0 emprega-se a equação (14) a fim de avaliar se o mosaico de ortoimagens atende ao PEC quanto à precisão, admitindo um nível de confiança de 90%.

$$\chi^2 = \frac{(n-1).S^2}{\sigma_0^2} \quad (14)$$

Compara-se o valor amostral do Qui-quadrado (χ^2) ao valor teórico (χ^2_α), sendo este último, para um tamanho da amostra igual a “58” e admitindo um intervalo de confiança de 90%, igual a “71,04”.

Os resultados obtidos seguem apresentados nas Tabelas 46, 47, 48 e 49, e para fins de entendimento a numeração dos mosaicos de ortoimagens segue conforme previamente descrita na Tabela 37.

TABELA 46 - AVALIAÇÃO DA PRECISÃO PLANIMÉTRICA DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 1 SEGUNDO O PEC

Mosaico de Ortoimagens	Escala	Classificação	Hipótese H_0	χ^2	Atende ao PEC
1	1:500	A	Rejeitada	101,33	Não
		B	Aceita	36,48	Sim
		C	Aceita	25,33	Sim
	1:1.000	A	Aceita	25,33	Sim
		B	Aceita	9,12	Sim
		C	Aceita	6,33	Sim
	1:1.500	A	Aceita	11,26	Sim
		B	Aceita	4,05	Sim
		C	Aceita	2,81	Sim
	1:2.000	A	Aceita	6,33	Sim
		B	Aceita	2,28	Sim
		C	Aceita	1,58	Sim

TABELA 47 - AVALIAÇÃO DA PRECISÃO PLANIMÉTRICA DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 2 SEGUNDO O PEC

Mosaico de Ortoimagens	Escala	Classificação	Hipótese H_0	χ^2	Atende ao PEC
2	1:500	A	Rejeitada	158,33	Não
		B	Aceita	57,00	Sim
		C	Aceita	39,58	Sim
	1:1.000	A	Aceita	39,58	Sim
		B	Aceita	14,25	Sim
		C	Aceita	9,90	Sim
	1:1.500	A	Aceita	17,59	Sim
		B	Aceita	6,33	Sim
		C	Aceita	4,40	Sim
	1:2.000	A	Aceita	9,90	Sim
		B	Aceita	3,56	Sim
		C	Aceita	2,47	Sim

TABELA 48 - AVALIAÇÃO DA PRECISÃO PLANIMÉTRICA DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 3 SEGUNDO O PEC

Mosaico de Ortoimagens	Escala	Classificação	Hipótese H_0	χ^2	Atende ao PEC
3	1:500	A	Rejeitada	82,08	Não
		B	Aceita	29,55	Sim
		C	Aceita	20,52	Sim
	1:1.000	A	Aceita	20,52	Sim
		B	Aceita	7,39	Sim
		C	Aceita	5,13	Sim
	1:1.500	A	Aceita	9,12	Sim
		B	Aceita	3,28	Sim
		C	Aceita	2,28	Sim
	1:2.000	A	Aceita	5,13	Sim
		B	Aceita	1,85	Sim
		C	Aceita	1,28	Sim

TABELA 49 - AVALIAÇÃO DA PRECISÃO PLANIMÉTRICA DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 4 SEGUNDO O PEC

Mosaico de Ortoimagens	Escala	Classificação	Hipótese H_0	χ^2	Atende ao PEC
4	1:500	A	Rejeitada	73,21	Não
		B	Aceita	26,36	Sim
		C	Aceita	18,30	Sim
	1:1.000	A	Aceita	18,30	Sim
		B	Aceita	6,59	Sim
		C	Aceita	4,58	Sim
	1:1.500	A	Aceita	8,13	Sim
		B	Aceita	2,93	Sim
		C	Aceita	2,03	Sim
	1:2.000	A	Aceita	4,58	Sim
		B	Aceita	1,65	Sim
		C	Aceita	1,14	Sim

Analisando a classificação dos mosaicos de ortomagens segundo os critérios de precisão planimétrica estabelecidos pelo PEC, percebe-se que, semelhante à avaliação de acurácia, tais mosaicos obtiveram classificação “B” a partir da escala 1:500, e classificação “A” a partir da escala 1:1.000. Fato este que demonstra que os mosaicos de ortomagens apresentaram equivalência em acurácia e precisão.

Se compararmos os resultados obtidos com as distribuições de probabilidade, apesar de diferenças muito pequenas, percebemos que o mosaico de ortomagens “2” apresentou melhor acurácia, e o mosaico de ortomagens “4” apresentou melhor precisão, ambos obtidos com a aplicação dos parâmetros de orientação relativa por imagem. Já os mosaicos que apresentaram resultados inferiores foram o mosaico de ortomagens “3” para a avaliação de acurácia, e o mosaico de ortomagens “2” na avaliação da precisão. O mosaico que apresentou melhores resultados tanto em acurácia quanto em precisão, foi o número “4”, onde foram empregados os POI provenientes da calibração em serviço e os parâmetros de orientação relativa por imagem.

Ressalta-se que, apesar da avaliação dos mosaicos de ortoimagens demonstrar que os mesmos podem ser classificados como Classe B (escala 1:500) ou Classe A (escala 1:1.000), a resolução espacial média das imagens aéreas também é um fator limitante da escala de representação cartográfica a ser utilizada. É recomendado que o tamanho do pixel do terreno, quando reduzido na escala final do produto cartográfico, não ultrapasse o valor do erro gráfico (0,2mm).

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conforme preconizado por Eisenhart (1963), a câmara deve ser calibrada tão próxima quanto possível das condições reais de uso do equipamento. Cortês (2010) analisando a estabilidade de câmaras de baixo custo, afirmou que os melhores resultados das calibrações por ele desenvolvidas foram a partir de procedimentos aéreos. Essa pesquisa focou nessa premissa e buscou comparar e avaliar dois procedimentos de calibrações aéreas, e também as influências dos POI obtidos por ambos na acurácia e precisão de ortoimagens. Ressalta-se que as ortoimagens foram obtidas pelo método de georreferenciamento direto sendo necessário realizar, além da calibração da câmara, a calibração de instalação, ou seja, a determinação dos parâmetros de orientação e posição relativa entre os múltiplos sensores e o sistema de navegação.

Os múltiplos sensores utilizados foram uma câmara digital de baixo custo e um SLSA. Considerando os critérios do PEC para escala 1:1.000 com classificação “A”, a integração entre ambos sensores permitiu a obtenção de ortoimagens pelo método de georreferenciamento direto, sem a utilização de nenhum ponto de apoio levantado em campo. O apoio utilizado foi através da nuvem de pontos proveniente do perfilamento aéreo a laser, fato que demonstra a potencialidade do uso da metodologia, como por exemplo, no mapeamento de áreas de difícil acesso em campo.

Nesta pesquisa foram avaliados dois procedimentos de calibração aérea, sendo um independente e outro em serviço. A partir da análise dos resultados, foi comprovada a qualidade e precisões obtidas por ambas as calibrações, porém, quando comparados os POI, foram observadas diferenças significativas, principalmente na posição do ponto principal. Tem-se como hipótese que as mesmas são devidas a configuração do voo empregada para cada aerolevante de calibração realizado, principalmente considerando que na calibração em serviço não foram realizadas faixas cruzadas. Outra possibilidade seria devido a grande diferença de tempo entre a realização de cada aerolevante (aproximadamente 11 meses). Um estudo maior a fim de se confirmar estas hipóteses é necessário.

Ao compararmos os dois procedimentos sob o ponto de vista prático e operacional, na configuração do voo para a calibração aérea em serviço foram apenas realizadas faixas de voo em direções opostas, e foi necessária a implantação de apenas 4 pontos de apoio plani-altimétricos na área de estudo, conforme comprovado através dos experimentos realizados. Já no procedimento de calibração independente, os POI obtidos através de um único aerolevantamento podem ser utilizados em diversos mapeamentos. Com base nessas informações é possível ponderarmos qual o melhor método de calibração a ser empregado dada uma determinada área a ser imageada.

Analisando a acurácia dos mosaicos de ortoimagens, percebeu-se que os mesmos não tiveram diferenças significativas se admitirmos a precisão das leituras nas imagens igual a 0,5 pixel. Dessa forma entende-se que com a metodologia empregada, independente de qual dos dois procedimentos aéreos de calibração forem utilizados (independente ou em serviço), as influências dos diferentes conjuntos de POI, na precisão e acurácia dos mosaicos de ortoimagens, não é significativa.

Ressalta-se que nesta pesquisa foram avaliados mosaicos de ortoimagens, ou seja, não foram consideradas as áreas das bordas das imagens onde possivelmente a influência das diferentes calibrações fosse mais perceptível. Entende-se que na etapa de imageamento aéreo com a finalidade de produção de ortoimagens, face às facilidades de aquisição de um elevado número de imagens devido à utilização de câmaras digitais, é possível empregarmos um recobrimento longitudinal de 60% (usualmente empregado enfocando o uso da estereoscopia) e lateral de 30%. Dessa forma utilizaríamos apenas cerca de 30% da região mais próxima ao centro de cada imagem, fato que, além de minimizar as distorções das lentes, reduz o efeito devido à perspectiva central.

Para o emprego do georreferenciamento direto é prevista a calibração do sistema, a qual pode ser dividida em duas partes: calibração individual dos sensores e calibração entre os sensores. A calibração entre os sensores, além da determinação dos parâmetros de instalação, prevê o sincronismo entre a transmissão e recepção dos dados entre os diversos equipamentos, como por exemplo, o registro do instante de aquisição de cada imagem no SLSA. Eventuais indeterminações nestes instantes foram compensadas nas determinações dos parâmetros de orientação relativa determinados numa etapa prévia à obtenção dos

mosaicos de ortoimagens. Considerando a câmara utilizada, com velocidade de *flash* externo igual a 0,005s, a uma velocidade da aeronave igual a 67m/s, obtém-se uma indeterminação de aproximadamente 33cm no sentido da direção de voo, o que demonstra a importância desta calibração. Tal sincronismo não foi objeto de estudo da presente pesquisa, sendo ainda enfoque para pesquisas futuras.

Outra recomendação também para futuros estudos, baseado nas metodologias aqui desenvolvidas, seria o emprego do procedimento de autocalibração da câmara utilizando dados do SLSA. Este procedimento prevê a determinação dos POI sem a implantação de nenhum controle no espaço objeto, o que proporcionaria um ganho ainda maior na relação custo-benefício.

REFERÊNCIAS

ALBERTZ, J. KREILING, W. **Photogrametric guide**. Ed. Wichmann, Karlsruhe, 1989.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 2003.

ANDRADE, J. B.; OLIVAS, M. A. A. **Calibração de câmeras aerofotogramétricas**. Boletim da UFPR. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, 1981.

APPLANIX CORP. **POS AV specifications**. Brochure. Richmond Hill, Canada. 2009.

BALTSAVIAS, E.P. **Airborne laser scanning: basic relations and formulas**, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 :199 – 214. 1999.

BAZAN, W.S.; TOMMASELLI, A.M.G.; GALO, M.; RUY, R.S. **Calibração de um sistema dual de câmaras digitais convergentes**. II Simpósio Brasileiro de Geomática V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas. Presidente Prudente, 2007.

BIN, X.; FANGFEI, L.; KESHU, Z.; ZONGJIAN, L. **Laser footprint size and pointing precision analysis for Lidar systems**. International Archives of Photogrammetric, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII. Part B1. Beijing. 2008.

BRASIL. **Decreto Nacional Nº 89.817** de 20 de junho de 1984.

BROWN, D. C. **A strategy for multi-camera on-the-job self-calibration**. Schriftenreihe 14, Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart. Festschrift Friedrich Ackermann zum 60. Geburtstag. 302 pages: 9–21. 1989.

BROWN, D. C. **Close-range camera calibration**. *PE&RS*, Vol. 37(8), pp.855-866. 1971.

CLARKE, T. A.; FRYER, J. G. **The development of camera calibration methods and models**. Photogrammetric Record, v. 16, n°91, p. 51-66, abril, 1998.

CORTÊS, J. B. R. **Análise da estabilidade geométrica de câmaras digitais de baixo custo com diferentes métodos de calibração**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 142p. 2010.

CRAMER M. **Direct geocoding – is aerial triangulation obsolete?** in: Fritsch D., Spiller R. (Eds.), Photogrammetric Week 1999, pp. 59-70. 1999.

DALMOLIN, Q. **Ajustamento por mínimos quadrados**. 2ª Edição. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R. **Sistema laserscanning: conceitos e princípios de funcionamento**. UFPR. 111 p. Curitiba, 2003.

DALMOLIN, Q.; LEAL, E. M. **Positional quality based on mapping bases generated from CAD**. Bol. Ciênc. Geod., Curitiba, v. 7, no 1, p.21-40,2001.

EISENHART, C. **Realistic evaluation of the precision and accuracy of instrument calibration systems**. Journal of Research of the National Bureau of Standards. C. Engineering and Instrumentation. 67C(2):161-87. Apr./Jun. 1963. USA. 1963.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações**. Editora UFPR. Curitiba, 1994.

GREJNER-BRZEZINSKA D. A.; TOTH C. K.; OSHEL, D. **Direct platform orientation in aerial and land-based mapping practice**. Real Time Mapping Technologies, ISPRS Working Group II/1, pp. 2-4-1 2-4-7. Bangkok, Thailand, April 21-23, 1999.

GONÇALVES, G. A. **Detecção automática de alterações na cartografia cadastral com base em imagens de câmaras digitais**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 265p. 2006.

HABIB, A.; KERSTING, A. **Analysis of Control and Flight Configuration Requirements for Mounting Parameters Calibration of GPS/INS-Assisted Photogrammetric Systems**. Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I, ISPRS, June 15 – 18, 2010, Calgary, Canada (un-paginated CD Rom)

HABIB, A. F.; MORGAN, M. **Stability analysis and geometric calibration of off-the-shelf digital cameras**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 71, No. 6, June, pp. 733-741, 2005.

HABIB, A.; PULLIVELLI, A.; MITISHITA, E.; GHANMA, M.; EUI-MYOUNG K. **Stability analysis of low-cost digital cameras for aerial mapping using different georeferencing techniques**. The Photogrammetric Record, v.21, n.113, p. 29-43, mar.2006.

HABIB, A.; SCHENK, T.. **Accuracy Analysis of Reconstructed Points in Object Space from Direct and Indirect Exterior Orientation Methods**. OEEPE Workshop on Integrated Sensor Orientation, Institute for Photogrammetry and Engineering Surveying, University of Hannover, 17-18 September, 2001.

HARINTAKA; SUBARYONO; SUSANTO, A.; HARTONO. **Assessment of Low Cost Small Format Aerial Photogrammetry for Cadastral Mapping (Case Study in Klaten Regency, Central Java, Indonesia)**. 7th FIG Regional Conference Spatial Data Serving People: Land Governance and the Environment – Building the Capacity Hanoi, Vietnam, 19-22 October 2009.

HÖFLE, B., PFEIFER, N. **Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches**. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 62, pp. 415-433. 2007.

JUBANSKI, J. J.; MITISHITA, E. A.; BAHR, H. P. **Análise do uso combinado de parâmetros de calibração convencionais de calibração em serviço na aerotriangulação de aerofotos obtidas com câmera de baixo custo**. *Bol. Ciênc. Geod.* [online]. 2010, vol.16, n.4, pp. 503-518. ISSN 1982-2170.

KATZENBEISSER, R. **About the calibration of LiDAR sensors**. Proceedings of the ISPRS workgroupIII/3 workshop Dresden, pp. 59 – 64. 2003.

KERSTING, A. **Quality Assurance of Multi-Sensor Systems**. D. Sc. Thesis, UCGE No 20346, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, Alberta, December, 2011.

KERSTING, A. **Mapeamento de obstáculos sob a faixa de domínio de linhas de transmissão usando uma abordagem orientada a objeto, tecnologia LiDAR e câmara digital de pequeno formato**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR. 174p. 2006.

KOCAMAN, S. **GPS and INS integration with Kalman Filtering for Direct Georeferencing of Airborne Imagery**. Geodetic Seminar Report. Institute of Geodesy and Photogrammetry. 2003.

LEIGH, G. E. **A study in improvement of one aspect of the metric camera system**. The Ohio State University, 1973.

LICHTI, D. D.; HABIB, A., DETCHEV, I. **An Object-space Simulation Method for Low-cost Digital Camera Stability Testing**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 75, No. 12, December 2009, pp. 1407–1414.

MALLET, C.; BRETAR F. **Full waveform topographic lidar: State-of-the-art**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 64: 1 – 16. 2009.

MARCATO, J.; TOMMASELLI, A. M. G.; RUY, R. S.; GALO, M. **Comportamento dos parâmetros de orientação interior e exterior na fototriangulação com parâmetros adicionais**. Artigo apresentado ao XVI SAGEC e VIII ENECART, Presidente Prudente, SP. 2009.

MARTINS, M. A. R. **Geração de ortoimagens a partir do georreferenciamento direto de imagens digitais aéreas de pequeno formato com dados LiDAR**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 131p. 2010.

MERCHANT, D. C. **Metric calibration of the aerial photographic system by the method of mixed ranges**. AFSC (RADC) TR-72-178, July, 1972. USA.

MITISHITA, E.; MARTINS, M.; CENTENO, J.; HAINOSZ, F. **Aerotriangulation supported by camera station position determined via physical integration of lidar and slr digital camera**. ISPRS Workshop. Laser Scanning 2011. Calgary, Canada. 2011.

MITISHITA, E.; CORTÊS, J.; CENTENO, J.; MACHADO, A. **Small-format digital camera: A study into stability analysis of the interior orientation parameters through temperature variation**. In.: 6th International Symposium on Mobile Mapping Technology, Presidente Prudente, SP, July 21-24, 2009.

MOFFIT, F.H. **Photogrammetry**. 3rd ed. New York: Harper & Row, 1980.

MOSTAFA, M. M. R., HUTTON, J. **Direct positioning and orientation systems – how do they work? What is the attainable accuracy?** American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). Annual Meeting, ST. Louis, MO, USA, April 22-27. 2001.

OPTECH INCORP. **ALTM Pegasus**. Brochure. Richmond Hill, Canada. 2011.

OPTECH INCORP. **Airborne Laser Terrain Mapper ALTM 1225 Installation Procedures Manual**, Document No. 195-090-07. Rev 1.1. Richmond Hill, Canada. jun, 2000.

PERSSON, Å.; SÖDERMAN, U.; TÖPEL, J.; ALHBERG, S. **Visualization and analysis of full-waveform airborne laser scanner data**. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 3/W19), 103_108. 2005.

PULLIVELLI, A. M. **Low-cost digital cameras: calibration, stability analysis, and applications**. M. Sc. Thesis, UCGE No 20216, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, Alberta, April, 2005.

SCHAER, P.; SKALLOUD, J.; LANDTWIG, S.; LEGAT, K. **Accuracy estimation for laser point cloud including scanning geometry**. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36(5): 8. 2007.

SCHWARZ, K. P., 1995. **Integrated airborne navigation systems for photogrammetry**, Photogrammetric Week 1995 (D. Fritsch and D. Hobbie, editors), Wichmann Verlag, Heidelberg, Germany, pp. 139–154, 1995.

SKALLOUD, J. **Optimizing Georeferencing of Airborne Survey Systems by INS/DGPS**. D. Sc. Thesis, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, Alberta, March, 1999.

SKALLOUD, J. **Strapdown INS Orientation Accuracy with GPS Aiding**. M.Sc. Thesis, UCGE No 200079, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, Alberta, april, 1995.

SOININEN, A. **TerraPhoto User's Guide**. TerraSolid Company. 2008.

WARNER, S.; GRAHAM, R. W., READ, R. E. **Small format Aerial Photography**. Whittles Publishing, Caithness (Scotland), UK, p. 348, 1996.

WEHR, A.; LOHR U. **Airborne laser scanning – an introduction and overview.** ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54, 68 - 82. 1999.

ZANDONÁ, D. F. **Potencial uso de dados Laserscanner aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR. 92p. 2006.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 - TABELA DE COORDENADAS DOS PONTOS LEVANTADOS EM CAMPO NA ÁREA DE ESTUDO DE PONTA GROSSA	106
APÊNDICE 2 - TABELA DE COORDENADAS DOS PONTOS LEVANTADOS EM CAMPO NA ÁREA DE ESTUDO DE TELÊMACO BORBA.....	107
APÊNDICE 3 - TABELA DE AVALIAÇÃO DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 1 (CALIBRAÇÃO INDEPENDENTE E ORIENTAÇÃO RELATIVA POR VOO).....	108
APÊNDICE 4 - TABELA DE AVALIAÇÃO DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 2 (CALIBRAÇÃO INDEPENDENTE E ORIENTAÇÃO RELATIVA POR IMAGEM)	109
APÊNDICE 5 - TABELA DE AVALIAÇÃO DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 3 (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO E ORIENTAÇÃO RELATIVA POR VOO)	110
APÊNDICE 6 - TABELA DE AVALIAÇÃO DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 4 (CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO E ORIENTAÇÃO RELATIVA POR IMAGEM)	111

APÊNDICE 1 - TABELA DE COORDENADAS DOS PONTOS LEVANTADOS EM CAMPO NA ÁREA DE ESTUDO DE PONTA GROSSA

Projeção Cartográfica UTM Fuso 22 S (SIRGAS2000)

ID	Tipo	E	N	H	ID	Tipo	E	N	H
P01	Pré-sinalizado	583722,34	7226371,88	924,54	P50	Pré-sinalizado	582667,53	7224646,45	882,89
P02	Pré-sinalizado	583517,37	7226576,41	920,06	P51	Pré-sinalizado	584574,69	7225801,59	967,71
P03	Pré-sinalizado	583674,64	7227090,60	923,62	P52	Pré-sinalizado	584469,94	7226039,71	960,45
P04	Pré-sinalizado	583405,16	7227093,51	920,44	P53	Pré-sinalizado	584463,26	7226013,27	962,13
P05	Pré-sinalizado	583080,70	7226952,19	912,86	P54	Pré-sinalizado	584612,51	7226313,80	950,48
P06	Pré-sinalizado	583087,94	7226799,55	923,86	P55	Pré-sinalizado	584960,68	7226402,93	940,58
P07	Pré-sinalizado	583054,19	7226669,86	930,75	P56	Pré-sinalizado	585257,45	7226575,03	941,41
P08	Pré-sinalizado	583069,29	7226462,09	940,45	P57	Pré-sinalizado	585274,71	7226298,88	958,51
P09	Pré-sinalizado	583283,44	7226390,80	937,42	P58	Pré-sinalizado	585211,10	7225963,39	962,92
P10	Pré-sinalizado	583132,17	7226086,56	936,95	P59	Pré-sinalizado	585548,56	7225741,05	939,16
P11	Pré-sinalizado	583422,53	7225927,32	931,83	P60	Pré-sinalizado	585287,35	7225521,52	939,41
P12	Pré-sinalizado	583605,70	7225599,19	943,98	P61	Pré-sinalizado	584934,88	7225533,87	955,63
P13	Pré-sinalizado	583499,17	7225362,33	936,46	P62	Pré-sinalizado	584934,86	7225533,87	955,63
P14	Pré-sinalizado	583629,84	7225202,27	947,98	F01	Fotoidentificável	583527,23	7224979,67	940,70
P15	Pré-sinalizado	583617,38	7225141,42	949,93	F02	Fotoidentificável	582137,59	7225286,04	927,56
P16	Pré-sinalizado	583891,48	7224944,08	959,63	F03	Fotoidentificável	582803,18	7225168,24	936,96
P17	Pré-sinalizado	583977,10	7225142,06	958,74	F04	Fotoidentificável	582618,99	7225543,43	948,84
P18	Pré-sinalizado	584053,45	7225220,59	961,40	F05	Fotoidentificável	583441,58	7225098,17	943,31
P19	Pré-sinalizado	584424,34	7225464,09	957,37	F06	Fotoidentificável	583521,99	7225874,87	935,10
P20	Pré-sinalizado	584199,16	7225529,19	968,55	F07	Fotoidentificável	584140,73	7225955,56	948,15
P21	Pré-sinalizado	584220,86	7225799,71	957,89	F08	Fotoidentificável	583809,49	7226127,32	935,54
P22	Pré-sinalizado	583881,58	7225582,59	951,95	F09	Fotoidentificável	583506,09	7226108,05	926,30
P23	Pré-sinalizado	583731,92	7225847,06	934,00	F10	Fotoidentificável	583682,86	7225399,77	945,08
P24	Pré-sinalizado	583896,09	7226185,99	932,04	F11	Fotoidentificável	583874,30	7225448,66	958,55
P25	Pré-sinalizado	584107,09	7226167,39	942,97	F12	Fotoidentificável	584299,69	7225697,25	967,52
P26	Pré-sinalizado	583959,03	7226339,88	930,54	F13	Fotoidentificável	584661,78	7225580,40	957,94
P27	Pré-sinalizado	583439,49	7226163,66	919,94	F14	Fotoidentificável	584524,24	7225900,14	970,38
P28	Pré-sinalizado	583142,64	7225363,23	944,30	F15	Fotoidentificável	585061,82	7225719,90	959,60
P29	Pré-sinalizado	583710,48	7224606,42	938,76	F16	Fotoidentificável	585227,93	7225959,95	962,71
P30	Pré-sinalizado	583779,24	7224328,43	929,20	F17	Fotoidentificável	583986,87	7225258,76	958,50
P31	Pré-sinalizado	583719,06	7224141,40	922,80	F18	Fotoidentificável	584060,94	7224857,60	966,90
P32	Pré-sinalizado	584180,76	7224468,02	957,95	F19	Fotoidentificável	584161,77	7224214,26	932,73
P33	Pré-sinalizado	584082,63	7224834,83	968,84	F20	Fotoidentificável	584530,84	7223884,47	952,73
P34	Pré-sinalizado	584374,94	7225100,70	969,42	F21	Fotoidentificável	583482,18	7226245,25	917,63
P35	Pré-sinalizado	584486,63	7224845,49	969,38	F22	Fotoidentificável	583741,19	7226351,82	924,85
P36	Pré-sinalizado	584694,23	7224551,74	947,28	F23	Fotoidentificável	583380,10	7226347,84	925,72
P37	Pré-sinalizado	584738,28	7224205,63	955,24	F24	Fotoidentificável	583652,28	7226505,06	910,75
P38	Pré-sinalizado	584413,17	7224119,68	950,03	F25	Fotoidentificável	583438,49	7226759,77	932,17
P39	Pré-sinalizado	584159,27	7224151,37	928,49	F26	Fotoidentificável	583590,96	7226836,84	923,04
P40	Pré-sinalizado	584265,23	7224484,76	960,48	F27	Fotoidentificável	584345,64	7224513,93	961,69
P41	Pré-sinalizado	582764,34	7225420,94	939,41	F28	Fotoidentificável	583849,24	7224756,75	954,15
P42	Pré-sinalizado	582899,68	7225670,42	938,78	F29	Fotoidentificável	584316,88	7224659,58	970,55
P43	Pré-sinalizado	582583,62	7225565,88	950,80	F30	Fotoidentificável	583933,38	7224463,58	955,06
P44	Pré-sinalizado	582190,48	7225510,48	952,76	F31	Fotoidentificável	583492,05	7225529,04	936,52
P45	Pré-sinalizado	582356,38	7225374,59	945,75	F32	Fotoidentificável	584089,25	7225792,77	950,05
P46	Pré-sinalizado	582334,88	7225025,65	906,33	F33	Fotoidentificável	583715,03	7225763,44	942,02
P47	Pré-sinalizado	582685,18	7225264,11	932,86	F34	Fotoidentificável	584821,19	7225944,46	957,05
P48	Pré-sinalizado	582932,18	7225114,65	941,49	F35	Fotoidentificável	582452,46	7225258,15	935,33
P49	Pré-sinalizado	583116,89	7224943,27	912,57	F36	Fotoidentificável	584374,80	7225093,43	969,74

APÊNDICE 2 - TABELA DE COORDENADAS DOS PONTOS LEVANTADOS EM CAMPO NA ÁREA DE ESTUDO DE TELÊMACO BORBA.

PROJEÇÃO CARTOGRÁFICA UTM FUSO 22 S (SIRGAS2000)

ID	TIPO	E	N	H	ID	TIPO	E	N	H
P001	Fotoidentificável	538004,05	7308742,16	757,87	P035	Fotoidentificável	538300,82	7309036,56	772,52
P002	Fotoidentificável	538049,58	7308691,12	754,76	P036	Fotoidentificável	538291,05	7309058	773,08
P003	Fotoidentificável	537987,1	7308758,01	757,78	P037	Fotoidentificável	538561,9	7308989,24	760,04
P004	Fotoidentificável	537916,86	7308679,64	766,1	P038	Fotoidentificável	538687,79	7308884,68	748,73
P005	Fotoidentificável	538055,43	7308794,83	756,34	P039	Fotoidentificável	538568,77	7308778,72	738,95
P006	Fotoidentificável	538036,15	7308800,72	756,61	P040	Fotoidentificável	538536,9	7308746,8	736,63
P007	Fotoidentificável	538100,51	7308865,9	758,73	P041	Fotoidentificável	538486,36	7308660,35	732,21
P008	Fotoidentificável	538115,59	7308857,74	759,09	P042	Fotoidentificável	538806,22	7308996,22	752,28
P009	Fotoidentificável	538150,57	7308916,63	762,67	P043	Fotoidentificável	538945,15	7309038,1	753,26
P010	Fotoidentificável	537946,2	7309067,52	744,26	P044	Fotoidentificável	538900,1	7308890,8	737,3
P011	Fotoidentificável	537882,73	7309026,94	743,97	P045	Fotoidentificável	537520,7	7308779,74	785,67
P012	Fotoidentificável	537971,84	7308982,13	745,72	P046	Fotoidentificável	537329,25	7308865,57	787,19
P013	Fotoidentificável	537913,91	7309347,43	736,99	P047	Fotoidentificável	537164,26	7308908,41	782,6
P014	Fotoidentificável	537899,69	7309315,02	736,59	P048	Fotoidentificável	537063,41	7308961,22	772,76
P015	Fotoidentificável	537837,47	7309293,68	736,11	P049	Fotoidentificável	537147,3	7309033,12	765,63
P016	Fotoidentificável	537748,72	7309297,85	744,94	P050	Fotoidentificável	537310,53	7309043,26	765,65
P017	Fotoidentificável	537646,84	7309290,15	755,81	P051	Fotoidentificável	537510,22	7309069,03	771,38
P019	Fotoidentificável	537892,74	7309477,7	729,65	P052	Fotoidentificável	537659,68	7309045,93	765,72
P020	Fotoidentificável	537879,46	7309518,84	727,46	P053	Fotoidentificável	537730,17	7309040,45	758,27
P021	Fotoidentificável	538132,88	7309443,77	748,45	P054	Fotoidentificável	538631,92	7309368,73	763,72
P022	Fotoidentificável	538014,08	7309324,78	749,61	P055	Fotoidentificável	538668,35	7309283,9	769,71
P023	Fotoidentificável	538064,22	7309267,37	757,06	P056	Fotoidentificável	538630,78	7309208,79	771,94
P024	Fotoidentificável	538135,84	7309218,58	764,41	P057	Fotoidentificável	538717,33	7309204,2	772,16
P025	Fotoidentificável	538242,74	7309335,97	763,27	P058	Fotoidentificável	538804,54	7309237,09	773,55
P026	Fotoidentificável	538343,25	7309435,46	758,08	P059	Fotoidentificável	538976,16	7309206,59	772,92
P028	Fotoidentificável	538278,99	7309227,06	772,31	P060	Fotoidentificável	539071,88	7309199,34	767,83
P029	Fotoidentificável	538355,1	7309301,34	768,68	P061	Fotoidentificável	538928,44	7309346,77	769,16
P031	Fotoidentificável	538517,73	7309279,86	771,91	P062	Fotoidentificável	539095,98	7309365,24	753,23
P032	Fotoidentificável	538395,65	7309155,33	775,39	P063	Fotoidentificável	538910,52	7309419,32	765,23
P033	Fotoidentificável	538427,89	7309135,22	774,42	P064	Fotoidentificável	538741	7309476,46	755,15
P034	Fotoidentificável	538330,75	7309062,94	773,7					

APÊNDICE 3 - TABELA DE AVALIAÇÃO DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 1
(CALIBRAÇÃO INDEPENDENTE E ORIENTAÇÃO RELATIVA POR VOO)

Projeção Cartográfica UTM Fuso 22 S (SIRGAS2000)							
Ponto	Coord, de Verificação		Coord, Ortoimagens		Resíduos		
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta \bar{R}$ (m)
1	538004,05	7308742,16	538004,03	7308742,29	-0,02	0,13	0,13
2	538049,58	7308691,12	538049,47	7308691,38	-0,11	0,26	0,28
3	537988,18	7308758,53	537988,03	7308758,94	-0,15	0,41	0,44
4	537916,86	7308679,64	537916,59	7308680,18	-0,27	0,54	0,61
5	538055,43	7308794,83	538055,41	7308795,15	-0,02	0,32	0,32
6	538036,15	7308800,72	538036,27	7308800,90	0,12	0,18	0,22
7	538100,51	7308865,90	538100,29	7308866,34	-0,22	0,44	0,49
8	538115,59	7308857,74	538115,65	7308858,41	0,06	0,67	0,67
9	538150,57	7308916,63	538150,41	7308917,08	-0,16	0,45	0,48
10	537946,20	7309067,52	537946,62	7309067,57	0,43	0,05	0,43
11	537882,73	7309026,94	537883,27	7309026,75	0,54	-0,19	0,57
12	537971,84	7308982,13	537972,33	7308982,15	0,49	0,02	0,49
13	537913,91	7309347,43	537913,80	7309347,56	-0,10	0,13	0,17
14	537899,69	7309315,02	537899,59	7309315,12	-0,10	0,11	0,14
15	537836,44	7309293,17	537836,95	7309293,61	0,51	0,44	0,67
16	537748,72	7309297,85	537748,54	7309297,69	-0,18	-0,16	0,24
17	537646,43	7309289,96	537646,78	7309289,86	0,35	-0,10	0,37
19	537892,74	7309477,70	537892,73	7309477,62	-0,01	-0,08	0,08
20	537879,46	7309518,84	537879,59	7309518,67	0,13	-0,17	0,21
21	538131,40	7309441,30	538131,40	7309441,57	0,00	0,27	0,27
22	538013,72	7309324,22	538014,21	7309325,00	0,49	0,78	0,93
23	538064,41	7309269,12	538064,64	7309269,45	0,23	0,33	0,41
24	538135,84	7309218,58	538136,33	7309218,81	0,49	0,23	0,55
25	538242,74	7309335,97	538243,18	7309336,23	0,44	0,26	0,51
26	538343,25	7309435,46	538343,80	7309434,70	0,55	-0,76	0,94
28	538278,99	7309227,06	538279,36	7309227,25	0,37	0,19	0,42
31	538517,73	7309279,86	538517,56	7309280,52	-0,17	0,66	0,69
32	538395,65	7309155,33	538395,78	7309155,63	0,13	0,30	0,33
33	538427,89	7309135,22	538428,21	7309135,58	0,32	0,36	0,48
34	538330,75	7309062,94	538330,84	7309063,04	0,09	0,10	0,13
35	538300,82	7309036,56	538301,12	7309036,70	0,30	0,14	0,33
36	538290,18	7309058,71	538290,38	7309059,14	0,20	0,43	0,48
37	538561,90	7308989,24	538562,12	7308989,35	0,22	0,11	0,24
38	538687,79	7308884,68	538687,58	7308884,73	-0,21	0,05	0,21
39	538568,77	7308778,72	538569,01	7308778,73	0,24	0,01	0,25
40	538536,90	7308746,80	538536,94	7308746,78	0,04	-0,02	0,04
41	538486,36	7308660,35	538486,06	7308660,81	-0,30	0,46	0,55
42	538806,22	7308996,22	538806,74	7308996,37	0,52	0,15	0,54
43	538945,15	7309038,10	538944,63	7309038,08	-0,52	-0,01	0,52
44	538900,10	7308890,80	538899,75	7308891,18	-0,35	0,38	0,52
45	537520,70	7308779,74	537520,85	7308779,76	0,15	0,02	0,15
46	537329,25	7308865,57	537329,12	7308865,40	-0,13	-0,17	0,21
47	537164,26	7308908,41	537164,13	7308908,37	-0,13	-0,04	0,13
48	537063,41	7308961,22	537063,31	7308961,02	-0,10	-0,20	0,22
49	537147,30	7309033,12	537147,07	7309033,02	-0,23	-0,10	0,25
51	537510,22	7309069,03	537510,21	7309068,88	-0,01	-0,15	0,15
52	537659,68	7309045,93	537659,84	7309045,96	0,16	0,03	0,16
53	537730,17	7309040,45	537730,52	7309040,24	0,35	-0,21	0,41
54	538632,32	7309369,37	538632,38	7309369,72	0,06	0,35	0,35
55	538668,35	7309283,90	538668,32	7309284,13	-0,03	0,24	0,24
56	538630,79	7309208,79	538630,87	7309208,95	0,08	0,16	0,18
57	538717,33	7309204,20	538717,57	7309204,40	0,24	0,20	0,32
58	538804,54	7309237,09	538804,85	7309237,25	0,31	0,16	0,35
59	538976,16	7309206,59	538975,77	7309206,42	-0,39	-0,17	0,43
60	539071,87	7309199,34	539071,73	7309199,24	-0,14	-0,10	0,17
61	538928,62	7309346,24	538928,42	7309346,49	-0,19	0,25	0,32
63	538910,52	7309419,32	538910,42	7309419,97	-0,10	0,65	0,66
64	538741,00	7309476,46	538740,79	7309476,68	-0,21	0,22	0,31
Média					0,07	0,16	0,37
Desvio Padrão					0,27	0,27	0,20
REMQU					0,28	0,31	0,42

APÊNDICE 4 - TABELA DE AVALIAÇÃO DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 2
(CALIBRAÇÃO INDEPENDENTE E ORIENTAÇÃO RELATIVA POR IMAGEM)

Projeção Cartográfica UTM Fuso 22 S (SIRGAS2000)							
Ponto	Coord, de Verificação		Coord, Ortoimagens		Resíduos		
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta \bar{R}$ (m)
1	538004,05	7308742,16	538003,97	7308741,78	-0,08	-0,38	0,39
2	538049,58	7308691,12	538049,45	7308690,84	-0,13	-0,28	0,31
3	537988,18	7308758,53	537988,06	7308758,26	-0,12	-0,27	0,29
4	537916,86	7308679,64	537916,56	7308679,45	-0,30	-0,19	0,35
5	538055,43	7308794,83	538055,35	7308794,47	-0,08	-0,36	0,37
6	538036,15	7308800,72	538036,10	7308800,37	-0,05	-0,35	0,35
7	538100,51	7308865,90	538100,29	7308865,63	-0,22	-0,27	0,35
8	538115,59	7308857,74	538115,63	7308857,68	0,04	-0,06	0,07
9	538150,57	7308916,63	538150,47	7308916,69	-0,10	0,06	0,12
10	537946,20	7309067,52	537946,05	7309067,43	-0,14	-0,09	0,17
11	537882,73	7309026,94	537882,68	7309026,75	-0,05	-0,19	0,20
12	537971,84	7308982,13	537971,65	7308982,09	-0,19	-0,04	0,20
13	537913,91	7309347,43	537913,46	7309347,47	-0,45	0,04	0,45
14	537899,69	7309315,02	537899,45	7309315,02	-0,24	0,00	0,24
15	537836,44	7309293,17	537836,27	7309293,43	-0,17	0,26	0,31
16	537748,72	7309297,85	537748,12	7309298,05	-0,60	0,20	0,63
17	537646,43	7309289,96	537646,17	7309290,24	-0,26	0,28	0,38
19	537892,74	7309477,70	537892,11	7309477,94	-0,63	0,24	0,67
20	537879,46	7309518,84	537879,11	7309519,10	-0,35	0,26	0,44
21	538131,40	7309441,30	538131,23	7309441,54	-0,17	0,24	0,29
22	538013,72	7309324,22	538013,95	7309324,91	0,23	0,69	0,73
23	538064,41	7309269,12	538064,30	7309269,29	-0,11	0,17	0,21
24	538135,84	7309218,58	538135,94	7309218,70	0,10	0,12	0,16
25	538242,74	7309335,97	538242,90	7309336,24	0,16	0,27	0,31
26	538343,25	7309435,46	538343,40	7309435,59	0,15	0,13	0,20
28	538278,99	7309227,06	538279,11	7309227,18	0,12	0,12	0,17
31	538517,73	7309279,86	538517,95	7309280,04	0,22	0,18	0,29
32	538395,65	7309155,33	538395,73	7309155,32	0,08	-0,01	0,08
33	538427,89	7309135,22	538428,15	7309135,32	0,26	0,10	0,27
34	538330,75	7309062,94	538330,89	7309062,82	0,14	-0,12	0,18
35	538300,82	7309036,56	538301,06	7309036,47	0,24	-0,09	0,26
36	538290,18	7309058,71	538290,30	7309058,69	0,12	-0,01	0,12
37	538561,90	7308989,24	538562,05	7308989,12	0,15	-0,12	0,19
38	538687,79	7308884,68	538687,97	7308884,56	0,18	-0,12	0,22
39	538568,77	7308778,72	538569,04	7308778,53	0,28	-0,19	0,33
40	538536,90	7308746,80	538537,21	7308746,56	0,31	-0,24	0,39
41	538486,36	7308660,35	538486,53	7308659,94	0,17	-0,41	0,44
42	538806,22	7308996,22	538806,71	7308996,04	0,49	-0,18	0,52
43	538945,15	7309038,10	538944,95	7309037,65	-0,20	-0,44	0,49
44	538900,10	7308890,80	538900,24	7308890,82	0,14	0,02	0,14
45	537520,70	7308779,74	537520,26	7308779,54	-0,44	-0,20	0,48
46	537329,25	7308865,57	537328,36	7308865,19	-0,89	-0,38	0,97
47	537164,26	7308908,41	537163,42	7308908,09	-0,84	-0,32	0,90
48	537063,41	7308961,22	537062,41	7308960,75	-1,00	-0,47	1,11
49	537147,30	7309033,12	537146,17	7309032,90	-1,13	-0,22	1,15
51	537510,22	7309069,03	537509,44	7309068,81	-0,78	-0,22	0,81
52	537659,68	7309045,93	537659,19	7309045,82	-0,49	-0,11	0,50
53	537730,17	7309040,45	537729,90	7309040,21	-0,27	-0,24	0,35
54	538632,32	7309369,37	538632,52	7309369,61	0,20	0,24	0,31
55	538668,35	7309283,90	538668,57	7309284,02	0,22	0,13	0,25
56	538630,79	7309208,79	538631,09	7309208,90	0,30	0,11	0,32
57	538717,33	7309204,20	538717,75	7309204,25	0,42	0,05	0,43
58	538804,54	7309237,09	538805,01	7309237,25	0,47	0,16	0,50
59	538976,16	7309206,59	538976,20	7309206,57	0,04	-0,02	0,04
60	539071,87	7309199,34	539072,14	7309199,29	0,27	-0,05	0,27
61	538928,62	7309346,24	538929,01	7309346,57	0,40	0,33	0,52
63	538910,52	7309419,32	538910,95	7309419,97	0,43	0,65	0,78
64	538741,00	7309476,46	538741,21	7309476,71	0,21	0,25	0,33
Média					-0,07	-0,02	0,38
Desvio Padrão					0,38	0,25	0,25
REMQU					0,38	0,25	0,46

APÊNDICE 5 - TABELA DE AVALIAÇÃO DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 3
(CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO E ORIENTAÇÃO RELATIVA POR VOO)

Projeção Cartográfica UTM Fuso 22 S (SIRGAS2000)							
Ponto	Coord, de Verificação		Coord, Ortoimagens		Resíduos		
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta \bar{R}$ (m)
1	538004,05	7308742,16	538004,34	7308742,21	0,29	0,05	0,29
2	538049,58	7308691,12	538049,76	7308691,32	0,18	0,20	0,27
3	537988,18	7308758,53	537988,48	7308758,63	0,30	0,10	0,32
4	537916,86	7308679,64	537917,07	7308680,06	0,21	0,42	0,47
5	538055,43	7308794,83	538055,79	7308794,98	0,36	0,15	0,39
6	538036,15	7308800,72	538036,53	7308800,77	0,38	0,05	0,38
7	538100,51	7308865,90	538100,61	7308866,12	0,10	0,22	0,24
8	538115,59	7308857,74	538115,99	7308858,12	0,40	0,38	0,55
9	538150,57	7308916,63	538150,72	7308916,88	0,15	0,25	0,29
10	537946,20	7309067,52	537946,62	7309067,54	0,43	0,02	0,43
11	537882,73	7309026,94	537883,24	7309026,78	0,51	-0,16	0,53
12	537971,84	7308982,13	537972,19	7308982,29	0,35	0,16	0,38
13	537913,91	7309347,43	537914,03	7309347,75	0,13	0,32	0,35
14	537899,69	7309315,02	537899,87	7309315,11	0,18	0,10	0,20
15	537836,44	7309293,17	537836,81	7309293,36	0,37	0,19	0,41
16	537748,72	7309297,85	537748,44	7309297,74	-0,28	-0,11	0,30
17	537646,43	7309289,96	537646,82	7309289,96	0,39	0,00	0,39
19	537892,74	7309477,70	537892,50	7309477,58	-0,23	-0,12	0,27
20	537879,46	7309518,84	537879,38	7309518,72	-0,08	-0,12	0,14
21	538131,40	7309441,30	538131,43	7309441,63	0,03	0,33	0,33
22	538013,72	7309324,22	538014,38	7309324,95	0,67	0,73	0,99
23	538064,41	7309269,12	538064,65	7309269,46	0,24	0,34	0,42
24	538135,84	7309218,58	538136,16	7309218,96	0,33	0,38	0,50
25	538242,74	7309335,97	538243,00	7309336,39	0,26	0,42	0,49
26	538343,25	7309435,46	538344,03	7309435,10	0,78	-0,36	0,86
28	538278,99	7309227,06	538279,24	7309227,58	0,25	0,52	0,58
31	538517,73	7309279,86	538517,96	7309280,23	0,23	0,38	0,44
32	538395,65	7309155,33	538395,91	7309155,39	0,26	0,06	0,27
33	538427,89	7309135,22	538428,42	7309135,28	0,53	0,06	0,53
34	538330,75	7309062,94	538331,14	7309062,92	0,39	-0,02	0,39
35	538300,82	7309036,56	538301,46	7309036,65	0,64	0,09	0,65
36	538290,18	7309058,71	538290,69	7309058,89	0,51	0,18	0,54
37	538561,90	7308989,24	538562,11	7308989,27	0,21	0,03	0,21
38	538687,79	7308884,68	538687,62	7308884,64	-0,17	-0,04	0,18
39	538568,77	7308778,72	538568,94	7308778,83	0,17	0,11	0,21
40	538536,90	7308746,80	538537,04	7308746,97	0,14	0,17	0,22
41	538486,36	7308660,35	538485,96	7308660,56	-0,40	0,21	0,45
42	538806,22	7308996,22	538806,80	7308996,76	0,58	0,54	0,79
43	538945,15	7309038,10	538944,33	7309038,00	-0,82	-0,09	0,83
44	538900,10	7308890,80	538899,58	7308891,23	-0,52	0,43	0,67
45	537520,70	7308779,74	537521,04	7308779,87	0,34	0,13	0,37
46	537329,25	7308865,57	537329,13	7308865,42	-0,12	-0,15	0,19
47	537164,26	7308908,41	537163,86	7308908,15	-0,40	-0,26	0,48
48	537063,41	7308961,22	537063,12	7308960,95	-0,29	-0,27	0,40
49	537147,30	7309033,12	537147,18	7309032,99	-0,12	-0,13	0,17
51	537510,22	7309069,03	537510,20	7309068,85	-0,02	-0,18	0,18
52	537659,68	7309045,93	537659,97	7309046,06	0,29	0,13	0,32
53	537730,17	7309040,45	537730,52	7309040,35	0,35	-0,10	0,37
54	538632,32	7309369,37	538632,53	7309369,40	0,21	0,03	0,21
55	538668,35	7309283,90	538668,62	7309283,95	0,27	0,06	0,27
56	538630,79	7309208,79	538631,22	7309208,97	0,43	0,18	0,47
57	538717,33	7309204,20	538717,86	7309204,28	0,53	0,08	0,54
58	538804,54	7309237,09	538804,99	7309237,14	0,45	0,05	0,46
59	538976,16	7309206,59	538976,00	7309206,41	-0,16	-0,18	0,24
60	539071,87	7309199,34	539071,62	7309199,22	-0,25	-0,12	0,28
61	538928,62	7309346,24	538928,67	7309346,58	0,06	0,34	0,35
63	538910,52	7309419,32	538910,73	7309419,98	0,21	0,66	0,69
64	538741,00	7309476,46	538741,38	7309476,67	0,38	0,21	0,43
Média					0,18	0,12	0,41
Desvio Padrão					0,31	0,23	0,18
REMQU					0,36	0,26	0,45

APÊNDICE 6 - TABELA DE AVALIAÇÃO DO MOSAICO DE ORTOIMAGENS 4
(CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO E ORIENTAÇÃO RELATIVA POR IMAGEM)

Projeção Cartográfica UTM Fuso 22 S (SIRGAS2000)							
Ponto	Coord, de Verificação		Coord, Ortoimagens		Resíduos		
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	$\Delta \vec{R}$ (m)
1	538004,05	7308742,16	538004,34	7308742,21	0,29	0,05	0,29
2	538049,58	7308691,12	538050,01	7308691,32	0,43	0,20	0,47
3	537988,18	7308758,53	537988,48	7308758,63	0,30	0,10	0,32
4	537916,86	7308679,64	537917,24	7308679,96	0,38	0,32	0,50
5	538055,43	7308794,83	538055,97	7308794,98	0,54	0,15	0,56
6	538036,15	7308800,72	538036,66	7308800,62	0,51	-0,10	0,52
7	538100,51	7308865,90	538100,77	7308866,08	0,26	0,18	0,31
8	538115,59	7308857,74	538116,10	7308858,08	0,51	0,34	0,61
9	538150,57	7308916,63	538150,72	7308916,88	0,15	0,25	0,29
10	537946,20	7309067,52	537946,62	7309067,54	0,43	0,02	0,43
11	537882,73	7309026,94	537883,24	7309026,78	0,51	-0,16	0,53
12	537971,84	7308982,13	537972,26	7308982,12	0,42	-0,01	0,42
13	537913,91	7309347,43	537914,19	7309347,19	0,28	-0,24	0,37
14	537899,69	7309315,02	537899,87	7309314,85	0,18	-0,17	0,24
15	537836,44	7309293,17	537836,95	7309293,34	0,51	0,17	0,54
16	537748,72	7309297,85	537748,62	7309297,80	-0,10	-0,05	0,11
17	537646,43	7309289,96	537646,91	7309290,07	0,48	0,11	0,50
19	537892,74	7309477,70	537892,75	7309477,63	0,02	-0,07	0,07
20	537879,46	7309518,84	537879,65	7309518,65	0,19	-0,18	0,26
21	538131,40	7309441,30	538131,64	7309441,12	0,24	-0,18	0,30
22	538013,72	7309324,22	538014,37	7309324,74	0,66	0,52	0,84
23	538064,41	7309269,12	538064,80	7309269,13	0,39	0,01	0,39
24	538135,84	7309218,58	538136,16	7309218,60	0,33	0,02	0,33
25	538242,74	7309335,97	538243,19	7309335,96	0,45	-0,01	0,45
26	538343,25	7309435,46	538343,75	7309435,35	0,50	-0,11	0,51
28	538278,99	7309227,06	538279,39	7309227,18	0,40	0,12	0,42
31	538517,73	7309279,86	538517,61	7309280,08	-0,12	0,22	0,25
32	538395,65	7309155,33	538395,82	7309155,41	0,17	0,08	0,19
33	538427,89	7309135,22	538428,28	7309135,27	0,39	0,05	0,39
34	538330,75	7309062,94	538331,03	7309062,80	0,28	-0,14	0,31
35	538300,82	7309036,56	538301,25	7309036,63	0,43	0,07	0,44
36	538290,18	7309058,71	538290,35	7309058,78	0,17	0,08	0,18
37	538561,90	7308989,24	538562,04	7308989,35	0,14	0,11	0,18
38	538687,79	7308884,68	538687,62	7308884,73	-0,17	0,05	0,18
39	538568,77	7308778,72	538568,82	7308778,86	0,05	0,14	0,15
40	538536,90	7308746,80	538537,04	7308746,97	0,14	0,17	0,22
41	538486,36	7308660,35	538486,17	7308660,48	-0,19	0,13	0,23
42	538806,22	7308996,22	538806,54	7308996,66	0,32	0,44	0,54
43	538945,15	7309038,10	538944,56	7309038,13	-0,59	0,04	0,59
44	538900,10	7308890,80	538899,62	7308891,19	-0,48	0,39	0,62
45	537520,70	7308779,74	537521,11	7308779,80	0,41	0,06	0,42
46	537329,25	7308865,57	537329,09	7308865,47	-0,16	-0,10	0,19
47	537164,26	7308908,41	537164,44	7308908,51	0,18	0,10	0,21
48	537063,41	7308961,22	537063,74	7308961,11	0,33	-0,11	0,34
49	537147,30	7309033,12	537147,24	7309033,08	-0,06	-0,04	0,07
51	537510,22	7309069,03	537510,14	7309068,74	-0,08	-0,29	0,30
52	537659,68	7309045,93	537660,00	7309045,98	0,32	0,05	0,32
53	537730,17	7309040,45	537730,52	7309040,35	0,35	-0,10	0,37
54	538632,32	7309369,37	538632,23	7309369,35	-0,09	-0,02	0,09
55	538668,35	7309283,90	538668,35	7309283,90	0,00	0,01	0,01
56	538630,79	7309208,79	538630,85	7309208,93	0,06	0,14	0,15
57	538717,33	7309204,20	538717,67	7309204,28	0,34	0,08	0,35
58	538804,54	7309237,09	538804,75	7309237,03	0,21	-0,06	0,22
59	538976,16	7309206,59	538975,67	7309206,5	-0,49	-0,09	0,50
60	539071,87	7309199,34	539071,27	7309199,29	-0,60	-0,05	0,61
61	538928,62	7309346,24	538928,53	7309346,26	-0,08	0,02	0,09
63	538910,52	7309419,32	538910,36	7309419,69	-0,16	0,37	0,40
64	538741,00	7309476,46	538740,9	7309476,23	-0,10	-0,23	0,25
Média					0,17	0,05	0,34
Desvio Padrão					0,29	0,17	0,17
REMQU					0,34	0,18	0,38